

О. П. АВДЕЄВА, О. П. УСАТИЙ, І. А. ПАЛЬКОВ, С. А. ПАЛЬКОВ, О. І. ІЩЕНКО

ЗАСТОСУВАННЯ КОМПЛЕКСНОЇ МЕТОДОЛОГІЇ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОТОЧНИХ ЧАСТИН ПАРОВИХ ТУРБІН

В статті викладено ефективність застосування комплексної методології при модернізації існуючих проточних частин парових турбін. Наведена методологія дозволяє збільшити абсолютний ККД на 0,83 %, а потужність турбіни на 1,87 % за рахунок використання об'єктно-орієнтованого підходу. Використання рекурсивного обходу різних рівнів оптимізації задля обміну інформацією між об'єктами дозволяє знайти оптимальне рішення для великої кількості конструктивних параметрів.

Ключові слова: парова турбіна, ефективність, оптимізація, проточна частина, ККД.

Е. П. АВДЕЕВА, А. П. УСАТЫЙ, И. А. ПАЛЬКОВ, С. А. ПАЛЬКОВ, О. И. ИЩЕНКО
ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДОЛОГИИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ПАРОВЫХ ТУРБИН

В статье изложена эффективность применения комплексной методологии при модернизации проточных частей паровых турбин. Приведенная методология позволяет увеличить абсолютный КПД на 0,83%, а мощность турбины на 1,87% за счет использования объектно-ориентированного подхода. Использование рекурсивного обхода различных уровней оптимизации для обмена информацией между объектами позволяет найти оптимальное решение для большого количества конструктивных параметров.

Ключевые слова: паровая турбина, эффективность, оптимизация, проточная часть, КПД.

O. AVDIEIEVA, O. USATYI, I. PALKOV, S. PALKOV, O. ISHCENKO
APPLICATION OF A COMPREHENSIVE METHODOLOGY TO OPTIMIZE THE FLOW PATHS OF STEAM TURBINES

The article describes the effectiveness of the application of a comprehensive methodology in the modernization of the flow paths of steam turbines. The paper considers two approaches to optimizing the flow path of steam turbines. The first approach is based on the independent optimization of individual turbine objects: nozzle steam distribution system, high, medium and low pressure cylinders. The second approach was to comprehensively optimize the entire flow path of steam turbines. The studies have shown the advantages of applying the second approach to the optimization of powerful steam turbines, which consist in increasing the efficiency of the turbine by taking into account the mutual influence of the turbine objects during complex optimization. The above methodology makes it possible to increase the absolute efficiency by 0.83 %, and the turbine power by 1.87 % due to the use of an object-oriented approach. The use of recursive traversal of various optimization levels for information exchange between objects allows finding an optimal solution for a large number of design parameters.

Key words: steam turbine, efficiency, optimization, flow path, efficiency.

Вступ

Світова потреба в електроенергії зростає кожного року. Тому у всьому світі завжди шукають нові можливості збільшити кількість енергії, що видобувається. В останні роки перевагу віддають відновлюваній енергетиці та модернізації існуючих турбін. Модернізація полягає як у зміні робочого тіла так і у зміні конструкції проточних частин. Тому створення нових методологій, програмних комплексів для розробки та модернізації існуючого парку турбін є актуальною задачею в енергетиці. В цьому напрямку існує вже досить багато робіт, більшість яких присвячена вдосконаленню окремих елементів проточної частини турбін [1–2], в яких використовуються різні методи і алгоритми: генетичний алгоритм [3], сукупне моделювання [4, 5], алгоритм бджолоїної сім'ї [6], методи теорії планування експерименту [7]. Подальший пошук резервів підвищення ККД парових турбін можливий тільки при наявності потужних обчислювальних технологій поряд з новими методами і підходами, реалізованими в рамках сучасних систем автоматизованого проектування (САПР).

Мета роботи

Мета роботи полягає у визначенні підходу, який необхідно застосовувати при оптимізації складних технічних систем, таких як парова турбіна, з метою підвищення її ефективності.

Постановка задачі

На даний момент існує безліч методів, алгоритмів пошуку оптимального рішення, а також велика кількість програмних комплексів [4, 5 та ін.]. Не виняток і програмний комплекс САПР «Турбоагрегат», орієнтований на пошук оптимального вирішення складних технічних систем (СТС). Завдання оптимального проектування такої системи з урахуванням обмежень і нерівностей в загальному вигляді можна представити таким чином:

$$\bar{Y}^{opt}(\bar{x}_k^{opt}) = \max \bar{Y}(\bar{x}_k), \bar{x}_k \in X, \bar{v}(\bar{x}_k) \in V, \\ \bar{Y}(Y_1(\bar{x}_k), Y_2(\bar{x}_k), \dots, Y_n(\bar{x}_k)), \quad (1)$$

$$N_{X \min} \leq |X| \leq N_{X \max} < \infty, N_{V \min} \leq |V| \leq N_{V \max} < \infty,$$

де \bar{Y} – вектор цільових функцій; \bar{x}_k – вектор конструктивних параметрів; \bar{v} – вектор функцій-

© О. П. Авдєєва, О. П. Усатий, І. А. Пальков, С. А. Пальков, О. І. Іщенко, 2020

нальних обмежень; V , X – області існування функціональних і конструктивних обмежень; $N_{V(\min, \max)}$, $N_{X(\min, \max)}$ – кордони областей існування відповідних обмежень. Рішення (1) – це екстремум цільової функції, що задовольняє обмеженням. Загальновідомим фактом є те, що СТС в основному являють собою або ієрархічно структуровані конструкції, або різні схематичні рішення, в яких елементи схеми також можуть мати свою власну структуру. Тому для вирішення завдання (1) СТС потрібні відповідні методології, методи і алгоритми. Одна з методик пошуку оптимальної конструкції проточної частини турбоагрегату запропонована в [8], де описано тривірневий блочно-

ієрархічний підхід до оптимізації циліндра турбіни. Недоліком такого підходу є відсутність врахування роботи регулюючої системи спільно з іншою проточною частиною. Це стало основою для розробки методології комплексної оптимізації проточної частини потужних парових турбін з використанням об'єктно-орієнтованого підходу [9]. Дана методика універсальна для СТС і використовувалася при отриманні результатів оптимізації турбіни К-310-240, наведених в даній статті.

В якості об'єкту дослідження візьмемо проточну частину турбіни К-310-240 виробництва АТ «Турбоатом». На рис. 1 розглянемо структуру розглянутого об'єкта з точки зору об'єктно-орієнтованого підходу.

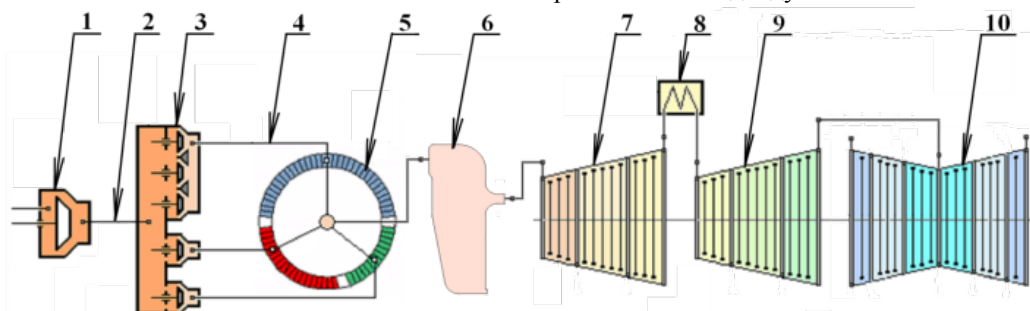


Рис. 1 – Схема проточної частини турбіни К-310-240:

1 – запірна арматура (СНР); 2 – запірний клапан лінійний (СНР); 3 – коробка з регулюючими клапанами (СНР); 4 – сегментні трубопроводи (СНР); 5 – сегменти регулюючого ступеня (СНР); 6 – вирівнювальна камера (ВК); 7 – циліндр високого тиску (Циліндр); 8 – промперегрів (Циліндр); 9 – циліндр середнього тиску (Циліндр); 10 – циліндр низького тиску (Циліндр)

Елементи, що становлять конструкцію, можна розділити на три об'єкти за своїм призначенням. Перший об'єкт – це «сопловий паророзподіл» (СНР), яке включає в себе запірний клапан, зворотний трубопровід, коробку з регулюючими клапанами, сегменти трубопроводів і регулюючу ступень (сегменти регулюючого ступеня). До другого об'єкту можна віднести ланку між СНР і рештою проточної частини – зрівнювальною камерою (ВК), яка призначена для вирівнювання потоку на вході в перший ступінь циліндру високого тиску. Третій об'єкт – «Циліндр» – включає циліндри високого, середнього та низького тиску (ЦВТ, ЦСТ, ЦНТ). Кожен з об'єктів, крім другого, можна розділити на підлеглі йому об'єкти. Поділ на підрівні можна проводити до тих пір, поки не буде визначено найпростіший об'єкт оптимізації.

Математичні моделі об'єктів різного рівня, які використовуються в програмному комплексі, наведені в інших попередніх роботах. Пропонована структура рішень задачі оптимізації реалізована таким чином, що можна вирішити задачу оптимізації всього об'єкта (потужна парова турбіна) і його окремих частин (СНР, ЦВТ, ЦСТ, ЦНТ, окрема ступень, окрема лопатка і ін.).

В якості методу пошукової оптимізації в підсистемі оптимізації використовуються псевдовипадкові послідовності чисел LPT. На рівнях оптимізації при пошуку оптимальних рішень для кожної точки з безлічі точок послідовності LPT обчислюється формальна макромодель (ФММ) функції

нальних обмежень. Отже, для точок, що задовольняють цим обмеженням, обчислюється ФММ критеріїв якості. Даний алгоритм оптимізації дозволяє вирішувати багатокритеріальні задачі з використанням згортки векторного критерію якості. Застосовуючи згортку критеріїв запропонованого методу при вирішенні задач оптимізації для різних комбінацій вагових коефіцієнтів, ми знаходимо точки, найбільш віддалені від початку координат, отримуючи таким чином набір незмінених рішень, відповідних фронту Парето. Алгоритм побудований таким чином, що при виборі оптимального рішення беруть участь як рішення, отримані в процесі обчислень, розрахунок експериментальної математичної моделі, так і п'ять кращих рішень з використанням пошуку LPT. Програмний комплекс САПР «Турбоагрегат» реалізований на принципах єдиного інтегрованого інформаційного простору і передбачає ієрархічно структурований формат опису інформаційних моделей оптимальних об'єктів проектування. За запропонованою методикою оптимального проектування проточної частини потужних парових турбін в САПР «Турбоагрегат» створений вищий рівень «Турбіна».

Результати досліджень

Оптимізація проточної частини турбіни К 310-240 проводилася за двома підходами.

Перший підхід – незалежна оптимізація окремих об'єктів турбіни: системи СНР (діаметри

регулюючих клапанів ($d_{\text{кРК}}$); кількість соплових каналів в кожному сегменті ($z_{\text{СК}}$); середній діаметр регулюючого ступеня ($d_{\text{сРС}}$); довжина соплової лопатки регулюючого ступеня ($l_{\text{сРС}}$); ефективний кут виходу з соплової решітки регулюючого ступеня ($\alpha_{1\text{сРС}}$); ефективний кут виходу з робочої решітки регулюючого ступеня ($\beta_{2\text{сРС}}$); ЦВТ (ефективний кут виходу потоку з направляючого апарату всіх ступенів тиску ($\alpha_{1\text{с}}$), крім першої; ефективний кут виходу потоку з робочого колеса всіх ступенів тиску ($\beta_{2\text{с}}$); кореневий діаметр і висота лопатки направляючого апарату першого ступеня тиску ($d_{\text{кЦВТ}}$, $l_{\text{сЦВТ}}$); ЦСТ (такі ж параметри, як і в ЦВТ); ЦНТ (ефективний кут виходу потоку з направляючого апарату другого ступеня тиску ($\alpha_{1\text{с}}$); ефективний кут виходу потоку з робочого колеса ступенів тиску ($\beta_{2\text{с}}$) перших двох ступенів тиску; кореневий діаметр направляючого апарату першого ступеня тиску ($d_{\text{кЦВТ}}$) з подальшим розрахунком, враховуючи роботу вирівнюючої камери (ВК).

Таким чином, для кожного оптимізуемого об'єкту вирішувалося чотири задачі: «прототип» – розрахунок прототипу; « η » – оптимізація за критерієм якості ККД оптимізуемого об'єкту; « N » – оптимізація за критерієм якості потужності оптимізуемого об'єкту; « $\eta + N$ » – оптимізація по цільовій функції, до складу якої входить критерій якості ККД і критерій якості потужності оптимізуемого об'єкта в рівних вагових частках.

В ході оптимізації проточної частини парової турбіни К-310-240 виявлено, що при розрахунку загальної системи рівнянь можуть виникати варіанти, в яких пропускна здатність турбіни не відповідає заданій, незважаючи на те, що при окремій оптимізації об'єктів турбіни витримувалися P_0^* , P_2 , G . Для забезпечення пропуску заданої витрати коректуються діаметр та висота соплової лопатки регулюючого ступеня.

Приріст інтегральних характеристик турбіни, отриманий за рахунок: підвищення ефективності соплової та робочої решіток регулюючого ступеня; зменшення дросельних втрат на регулюючих клапанах; зміни розподілу теплоперепадів між ступенями ЦВТ, ЦСТ, ЦНТ; зменшення прикорневих і радіальних претікань в решітках ЦВТ, ЦСТ, ЦНТ; збільшення ефективності соплових і робочих решіток ЦВТ, ЦСТ, ЦНТ.

Другий підхід – комплексна оптимізація проточної частини турбіни. На першому рівні «Турбіна» оптимізуються: діаметри регулюючих клапанів ($d_{\text{кРК}}$); кількість соплових каналів в кожному сегменті ($z_{\text{СК}}$); середній діаметр регулюючого ступеня ($d_{\text{сРС}}$); довжина соплової лопатки регулюючого ступеня ($l_{\text{сРС}}$); кореневий діаметр направляючого апарату першого ступеня тиску ЦВТ, ЦСТ і ЦНТ ($d_{\text{кЦВТ}}$, $d_{\text{кЦСТ}}$, $d_{\text{кЦНТ}}$); висота лопатки направляючого апарату першого ступеня тиску ЦВТ і ЦСТ ($l_{\text{сЦВТ}}$, $l_{\text{сЦСТ}}$).

На другому рівні «СПР» і «Циліндр» оптимізується: ефективні кути виходу з усіх соплових і робочих решіток за винятком ефективних кутів виходу із соплових решіток перших ступенів циліндрів, що забезпечують пропускну спроможність циліндрів.

Для першого рівня оптимізації обрані наступні функції цілі: абсолютний ККД, потужність турбіни і в рівних вагових частках абсолютний ККД і потужність турбіни. На другому рівні «Циліндр» оптимізація для ЦВТ, ЦСТ і ЦНТ оптимізація здійснюється по тих же функціях цілі, як і в першому підході. Оптимізація на рівні «СПР» проводилася за трьома цільовими функціями: ККД регулюючого ступеня; потужність регулюючого ступеня; ККД і потужність регулюючого ступеня в рівних вагових частках. Проведені дослідження показали, що проточну частину потужної парової турбіни доцільно оптимізувати по двокритеріальній цільовій функції. В табл. 1 наведено порівняльний аналіз інтегральних характеристик за двома підходами.

Таблиця 1 – Порівняння інтегральних характеристик турбіни К-310-240, отриманих за допомогою двох підходів

Параметр	Результати розрахунків		
	Прото-тип	1-й підхід	2-й підхід
Абсолютний ККД циклу η_a	0,4441	0,4510	0,4524
Приріст абсолютного ККД циклу $\Delta\eta_a$, %	0	0,65	0,83
Потужність турбіни N , МВт	330,577	335,2	336,76
Приріст потужності ΔN , МВт	0	4,638	6,179

Виходячи з наведених даних (табл. 1), визначено, що другий підхід, заснований на розробленій методології об'єктно-орієнтованої комплексної оптимізації проточної частини парових турбін реалізованої в САПР «Турбоагрегат», такого складного об'єкта як потужна парова турбіна, найбільш ефективний. Такий підхід дає приріст потужності турбіни в порівнянні з прототипом на 1,87 % і приріст абсолютного ККД циклу на 0,83 %, що відповідно сприяє економії паливних ресурсів. З порівняльного аналізу значень ККД об'єктів турбіни, отриманих різними підходами, по відношенню до прототипу та приросту потужності об'єктів турбіни видно, що використання першого підходу при оптимізації турбіни призводить до значного збільшення значення ККД регулюючого ступеня. Незважаючи на це абсолютний ККД турбіни вище при використанні другого підходу оптимізації на 0,18 % по відношенню до першого підходу. Істотний приріст потужності турбіни, при використанні другого підходу в порівнянні з першим, в основному отриманий за рахунок поліпшених показників ЦВТ. Потужність ЦВТ, отримана по другому підходу перевищує майже в два рази теж значення, отримане по першому підходу. Таким чином, проведені дослідження показали переваги застосування другого підходу до оптимізації потужних парових турбін, які полягають у підвищенні ефективності турбіни за рахунок обліку взаємного впливу об'єктів турбіни при комплексній оптимізації. Цей висновок підтверджується зміною теплоперепадів в основному першої і останньої ступенів ЦСТ при різних підходах оптимізації.

Висновки

Запропонований об'єктно-орієнтований підхід до комплексної оптимізації проточної частини потужної турбіни, реалізований в САПР «Турбоагрегат», показав свою ефективність на прикладі турбіни К-310-240. Вперше виявлено та оцінено взаємний вплив турбінних об'єктів на її оптимальні характеристики. Застосування універсальної методики СТС показало свою ефективність при багаторівневої і багатокритеріальної оптимізації турбіни К-310-240 в складі, що включає різні типи об'єктів. В результаті комплексної оптимізації цієї турбіни її потужність була збільшена на 6,179 МВт (~ 1,87 %), а приріст абсолютного ККД циклу склав 0,83 % щодо прототипу.

Список літератури

1. Cao L., Si H., Lin A., Li P., Li Y. Multi-factor optimization study on aerodynamic performance of low-pressure exhaust passage in steam turbines. *Applied Thermal Engineering*. 2017. No. 124. PP. 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05/136>.
2. Turner M. G., Park K. [at alias] Framework for multidisciplinary optimization of turbomachinery. *Proceedings of ASME Turbo Expo*. 2010. GT2010-22228. <https://doi.org/10.1115/GT2010-22228>.
3. Safari A., Lemu H. G., Assadi M. A novel combination of adaptive tools for turbomachinery airfoil shape optimization using a real-coded genetic algorithm. *Proceedings of ASME Turbo Expo*. 2013. GT2013-94093. <https://doi.org/10.1115/GT2013-94093>.
4. Ogaday W., Moore W., Mala-Jetmarova H., Gebreslassie M., Tabora G. R., Belmont M. R., Savic D. A. Comparison of multiple surrogates for 3D CFD model in tidal farm optimization. *Procedia Engineering*. 2016. No. 154. PP. 1132–1139. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.523>.
5. Mehmani A. *Uncertainty-integrated surrogate modeling for complex system optimization* : Ph.D. thesis. Syracuse University, 2015.
6. Yang X., Liu BO., Cao Z. Opposition-based artificial bee colony algorithm application in optimization of axial compressor blade. *Proceedings of ASME Turbo Expo*. 2013. GT2013-95177.
7. Usatyi O., Avdieieva O., Maksiuta D., Tuan P. Experience in applying DOE methods to create formal macromodels of characteristics of elements of the flowing part of steam turbines. *AIP Conference Proceedings*. 2018. vol. 2047. no. 1. PP. 020025. <https://doi.org/10.1063/1.5081658>.
8. Boiko A., Govorushchenko, Y. and Usaty, A. *Optimization of the Axial Turbines Flow Paths : monograph*. – New York: Science Publishing Group, 548 Fashion Avenue New York, NY 10018, U.S.A, 2016. – 272 p. – ISBN 978-1-940366-67-8. –

Mode of access:
<http://www.sciencepublishinggroup.com/book/B-978-1-940366-67-8>. – 12.10.2020.

9. Бойко А. В., Усатий А. П., Авдеева Е. П. Методология объектно-ориентированной комплексной оптимизации проточных частей мощных паровых турбин с учетом переменного режима работы. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2014. № 13(1056). С. 5–10. Бібліогр.: 10 назв. ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line).

References (transliterated)

1. Cao L., Si H., Lin A., Li P., Li Y. (2017), "Multi-factor optimization study on aerodynamic performance of low-pressure exhaust passage in steam turbines", *Applied Thermal Engineering*, no. 124, pp. 224–231, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05/136>.
2. Turner, Mark G., Park, K. [at alias] (2010), "Framework for multidisciplinary optimization of turbomachinery", *Proceedings of ASME Turbo Expo*, GT2010-22228, <https://doi.org/10.1115/GT2010-22228>.
3. Safari, A., Lemu, H. G., Assadi, M. (2013), "A novel combination of adaptive tools for turbomachinery airfoil shape optimization using a real-coded genetic algorithm", *Proceedings of ASME Turbo Expo*, GT2013-94093, <https://doi.org/10.1115/GT2013-94093>.
4. Ogaday W., Moore W., Mala-Jetmarova H., Gebreslassie M., Tabora G. R., Belmont M. R., Savic D. A. (2016), "Comparison of multiple surrogates for 3D CFD model in tidal farm optimization", *Procedia Engineering*, no. 154, pp. 1132–1139, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.523>.
5. Mehmani A. (2015), *Uncertainty-integrated surrogate modeling for complex system optimization* : Ph.D. thesis, Syracuse University.
6. Yang X., Liu BO., Cao Z. (2013), "Opposition-based artificial bee colony algorithm application in optimization of axial compressor blade", *Proceedings of ASME Turbo Expo*, GT2013-95177.
7. Usatyi O., Avdieieva O., Maksiuta D., Tuan P. (2018), "Experience in applying DOE methods to create formal macromodels of characteristics of elements of the flowing part of steam turbines", *AIP Conference Proceedings*, vol. 2047, no. 1, p. 020025, <https://doi.org/10.1063/1.5081658>.
8. Boiko, A., Govorushchenko, Y. and Usaty, A. (2016), *Optimization of the Axial Turbines Flow Paths*, Published by Science Publishing Group 548 Fashion Avenue New York, NY 10018, U.S.A, ISBN 978-1-940366-67-8, available at: <http://www.sciencepublishinggroup.com/book/B-978-1-940366-67-8> (accessed 12 October 2020).
9. Boiko A. V., Usaty A. P., Avdieieva O. P. (2014), "Methodology of the Object-Oriented Complex Optimization of the Flow Passes of Powerful Steam Turbines Taking into Consideration the Variable Operation Mode". *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 13(1056). pp. 5–10. ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line).

Надійшла (received) 18.10.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Авдеева Олена Петрівна (Авдеева Елена Петровна, Avdieieva Olena) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри турбінобудування, м. Харків, Україна; e-mail: Olena.Avdieieva@khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9358-4265>.

Усатий Олександр Павлович (Усатый Александр Павлович, Oleksandr Usatyi) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри турбінобудування, м. Харків, Україна; e-mail: alpaus@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8568-5007>.

Пальков Ігор Андрійович (Пальков Игорь Андреевич, Palkov Ihor) – заступник головного конструктора парових турбін АТ «Турбоатом»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4639-6595>; e-mail: igorpalkov@i.ua.

Пальков Сергій Андрійович (Пальков Сергей Андреевич, Palkov Sergii) – начальник сектору конструкторського відділу АТ «Турбоатом»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2215-0689>; e-mail: sergpalkov@gmail.com.

Ищенко Олег Ігоревич (Ищенко Олег Игоревич, Ishchenko Oleh) – провідний конструктор конструкторського відділу АТ «Турбоатом»; м. Харків, Україна; e-mail: oleg_ishchenko@i.ua.