

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ІМПУЛЬСНИХ ДВОНАПРАВЛЕНИХ ТУРБІН В ТЕРМОАКУСТИЧНИХ ТЕПЛОВИХ МАШИНАХ

**Коробко В. В.**, к.т.н., доцент, доцент кафедри суднових та стаціонарних енергетичних установок Національного університету кораблебудування імені адмірала С. О. Макарова (м. Миколаїв), E-mail: volodymyr.korobko@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5761-6824;

**Московко О. О.**, асистент кафедри суднових та стаціонарних енергетичних установок Національного університету кораблебудування імені адмірала С. О. Макарова (м. Миколаїв), E-mail: oleksiy.moskovko@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3848-5651;

**Воронов І. В.**, магістр Національного університету кораблебудування імені адмірала С. О. Макарова (м. Миколаїв), E-mail: volodymyr.korobko@nuos.edu.ua

*Створення ефективних систем використання низькотемпературних джерел теплової енергії є важливою задачею для енергетики, промисловості, транспорту, флоту. Вдосконалення теплових двигунів зумовлює постійне зниження температурного рівню скидної теплоти. Впровадження LNG палив додає так звані «кріогенні» теплові ресурси систем регазифікації скрапеного газу. Термоакустичні технології потенційно здатні забезпечити можливості утилізації низькотемпературних скидних теплових ресурсів. Упровадженню цих технологій заважає складність безпосереднього отримання електричної енергії від термоакустичних двигунів. Використання п'єзоперетворювачів і лінійних електричних генераторів призводить до зростання вартості таких систем, обмежує їх потужність і погіршує надійність. Впровадження імпульсних двонаправлених турбін (ІДТ) має сприяти вирішенню проблеми. За допомогою програми DELTA ЕС проведені варіантні розрахунки термоакустичного двигуна (ТАД) з циклом Брайтона. У результаті конструкція ТАД була оптимізована для використання ІДТ. У роботі досліджені характеристики опитного зразку ІДТ, надано опис експериментального стенду, приведені результати експериментальних досліджень, визначені напрямки подальшої діяльності.*

**Ключові слова:** імпульсна двонаправлена турбіна, скидні енергетичні ресурси, термоакустика, теплові машини.

**Постановка проблеми.** Термоакустичні теплові двигуни (ТАД) призначені для перетворення теплової енергії від різних зовнішніх джерел в механічну у вигляді потужних акустичних хвиль. У подальшому, цю механічну енергію коливного руху треба трансформувати в потрібну для споживача форму. Для цього використовують різні типи корисного навантаження, це або термоакустичні апарати, або електромеханічні системи.

Найбільш простим шляхом є застосування зворотної ТАТМ – термоакустичного теплового насоса (ТАТН) або рефрижератора (ТАР), які здатні забезпечити або отримання холоду, або підвищити наявний потенціал скидних теплових ресурсів [1,2]. Зрозуміло, що такий варіант можливий тільки за наявністю потреби в таких ресурсах.

Найбільш універсальним рішенням є продукування електричної енергії, але з цим виникають проблеми, пов'язані з властивостями цих перетворювачів. Отже, створення нових та ефективних типів корисного навантаження є актуальною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У перших зразках ТАТМ були використані електрогенератори на базі п'єзоперетворювачів і лінійних генераторів [3], які в своєму складі мали частини, що підтверджені механічній деформації. На практиці такі конструкції показали ряд суттєвих недоліків – низьку надійність та високу вартість.

Так, за даними Де Блока вартість лінійного генератора становить 3000 євро за 1 кВт електричної потужності [4]. П'єзоперетворювачі характеризуються низькою механічною міцністю, малою питомою потужністю й іншими недоліками.

Ці обставини вимагають розробки нових більш надійних видів корисного навантаження. Можливим варіантом може стати використання ротативних перетворювачів, які трансформують коливальний рух робочого середовища в обертальний.

У відновлювальній енергетиці є приклади створення хвильових електростанцій з осцилюючими повітряними колонами – OWC рис. 1. У цих конструкціях колильний рух повітряного стовпа забезпечує обертання двонаправлених турбін – це турбіни Уеллса (Wells turbine) й імпульсні двонаправлені турбіни. Відомі роботи, в яких розглянуті різні аспекти проектування та використання двонаправлених турбін в хвильових електростанціях [5, 6].

Оскільки в ТАТМ має місце коливальний рух робочого середовища, цілком логічною є ідея застосувати подібні механізми в ТАТМ. В останній час з'явилися роботи, в яких розглядається це питання [7, 8].

Вважаючи на перспективність використання ІДТ в ТАТМ та брак досвіду відносно роботи таких пристроїв, як вузла ТАД, було вирішено започаткувати власні дослідження.

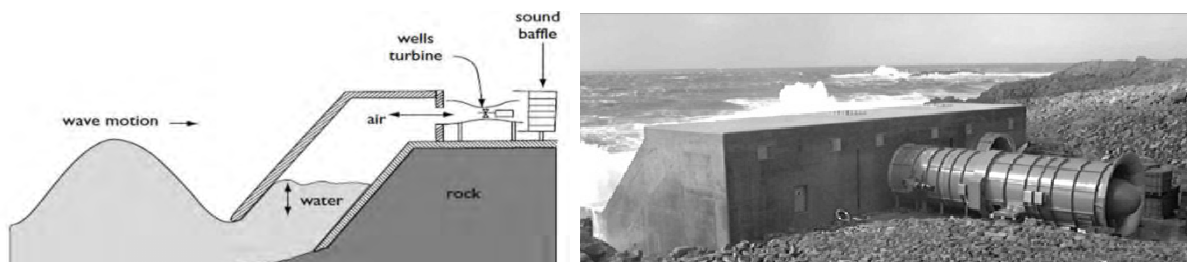


Рисунок 1 – Хвильова електростанція з OWC та двонаправленими турбінами

**Ціль роботи** – за допомогою чисельного моделювання та фізичного експерименту дослідити особливості ТАТМ з імпульсними двонаправленими турбінами, а також характеристики таких турбін.

**Викладення основного матеріалу.** У попередній роботі було розглянуто можливість створення суднової енергогенеруючої системи регазифікації LNG палива на основі ТАТМ [9]. Тоді в якості корисного навантаження «кріогенного» ТАД (рис. 2) було передбачено застосування лінійного генератора електричного струму.

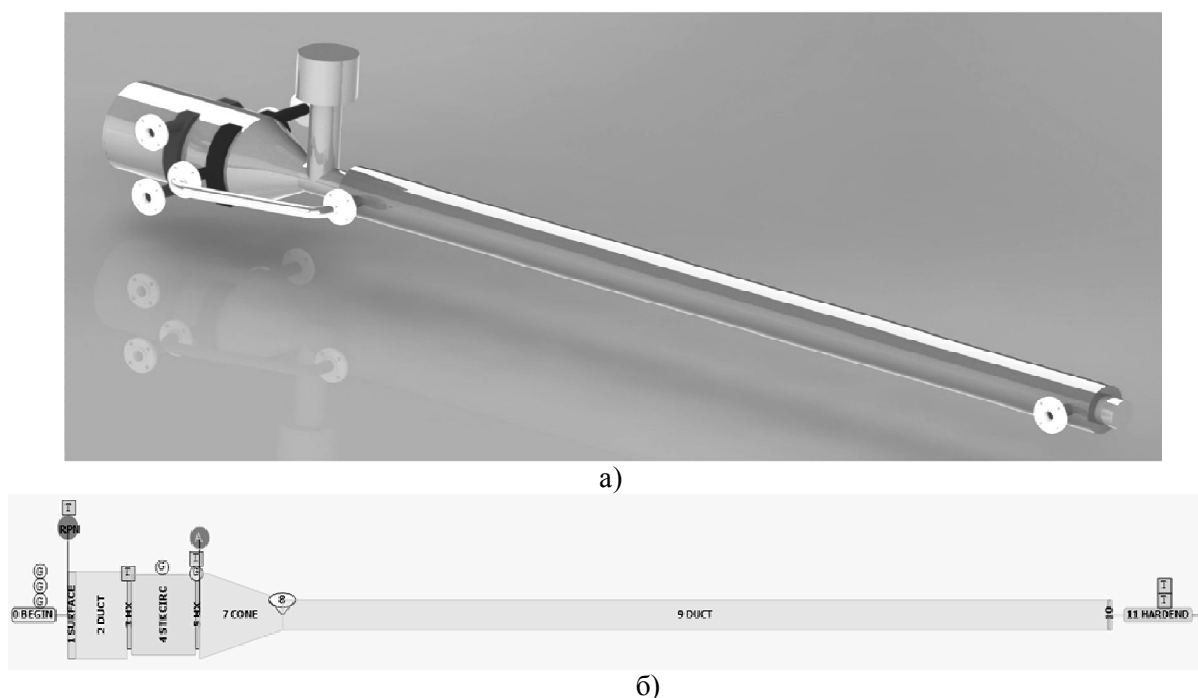


Рисунок 2 – «Кріогенний» ТАД: а) ескіз; б) розрахункова схема в програмі Delta EC

У даному випадку вивчається можливість застосування у складі ТАТМ ІДТ з електричним генератором. Важливим моментом є визначення оптимальної міста розташування ІДТ в резонаторі ТАД.

Дослідження були поділені на дві частини:

- перша була спрямована на числове моделювання акустичних процесів в резонаторі ТАД. Мета цих розрахунків – оптимізація конструкції резонатору ТАД для установки ІДТ, як корисного навантаження;
- друга частина роботи присвячена виготовленню опитного зразку ІДТ та експериментальному дослідженню його характеристик.

**Числове моделювання.** Для розрахункових досліджень було вирішено використати енергогенеруючу систему регазифікації [9]. Необхідні зміни були внесені лише в конструкцію ТАД з метою забезпечення оптимальних умов для ефективної роботи ІДТ в пульсуючому середовищі. Конструкція такого оновленого ТАД з ІДТ показана на рис. 3.

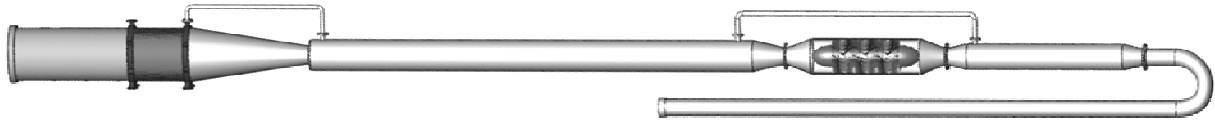


Рисунок 3 – ТАД з імпульсною двонаправленою турбіною

Відомо, що ІДТ в ОВС працюють на низьких частотах порядку 5–15 Гц, при відносно великих значеннях амплітуди коливного руху. Враховуючи ці обставини, було прийнято рішення зменшити робочу частоту ТАД. За для цього, довжина резонатору була збільшена від 4.9 м до 16 м.

Розрахунки виконувались з допомогою програмного пакету Delta EC [10], який призначений для моделювання термоакустичних систем та досліджень комплексу теплофізичних параметрів, пов'язаних з цим. Програма DELTA EC дозволяє розрахувати потужності ТАД та характеристики акустичної хвилі безпосередньо в резонаторі ТАД.

Оскільки в обраному ТАД маємо термодинамічний цикл Брайтону зі стоячою хвилею, зрозуміло, що ІДТ, як чисто активну турбіну, слід розташувати в зоні вузла акустичного тиску  $P_1$ , де коливальна швидкість  $U_1$  та коливальні зміщення робочого середовища –  $\zeta$  максимальні:

$$U_1 = \frac{P_{1\max}}{\rho C} \quad (1)$$

$$\zeta = U_1 / 2\pi f \quad (2)$$

де  $P_{1\max}$  – амплітуда акустичного тиску,  $\rho$  – щільність робочого середовища,  $C$  – швидкість звуку в робочому середовищі,  $f$  – частота акустичних коливань.

У результаті варіантних розрахунків було визначено геометричні параметри резонатору ТАД, які забезпечили максимум коливальної швидкості максимально поблизу до модулю термоакустичних перетворень рис. 4.

Зрозуміло, що такі розрахунки дають більш якісну картину відносно конструкції ТАД та теплофізичних процесів в ньому. Для отримання кількісних результатів бракує інформації про сумісну роботу ТАД та ІДТ в потужних акустичних полях, коли умови суттєво відрізняються від тих, що мають місце в ОВС.

Отримані результати дають змогу зробити висновок про доцільність використання в ТАД блоку послідовно розташованих ІДТ, що дає потенційну можливість для створення потужних агрегатів ТАД – ІДТ.

**Експериментальні дослідження.** Виходячи з параметрів наявних зразків ТАД і можливостей дослідного обладнання, були спроектовані та виготовлені модель осьової ІДТ та спеціальний стенд для проведення експериментів.

**Дослідний стенд та обладнання.** Принципова схема стенду для дослідження ІДТ показана на рис. 5. Основний елемент стенду – це імпедансна труба відкритого типу, яка оснащена чотирма датчиками тиску, термоанемометром, низькочастотним гучномовцем, еталонним підсилювачем, мікропроцесорною контрольно – вимірювальною системою.

Керуючий сигнал від програмованого генератора подавався на підсилювач з комп'ютеру. Це давало змогу змінювати частоту сигналу, контролювати акустичну потужність, що подавалась на турбіну.

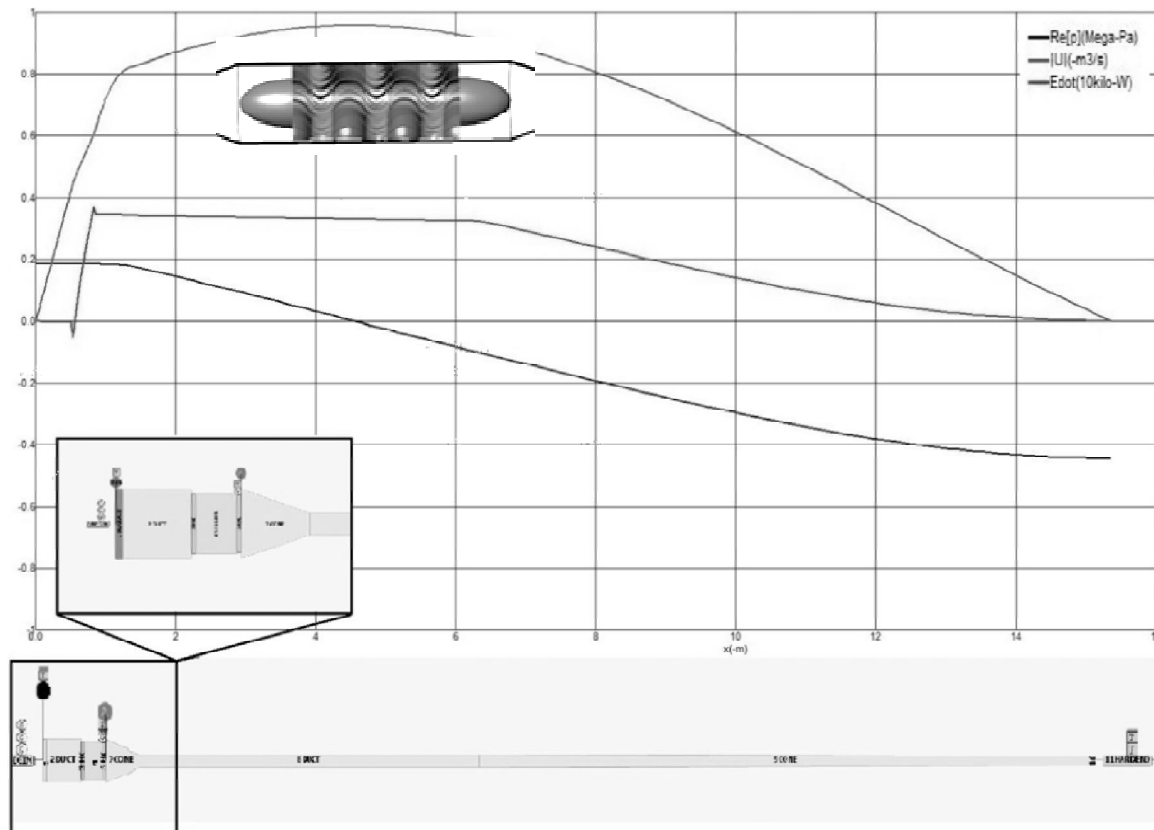


Рисунок 4 – Розподіл акустичної потужності, тиску, об'ємної швидкості в резонаторі ТАД

Імпульсна турбіна є складним навантаженням для акустичної системи, оскільки її імпеданс залежить від обертів та інших факторів. У зв'язку з цим, зворотній зв'язок між акустичною системою та гучномовцем може привести к спотворенню форми фронту акустичної хвилі, що буде впливати на роботоспроможність ІДТ.

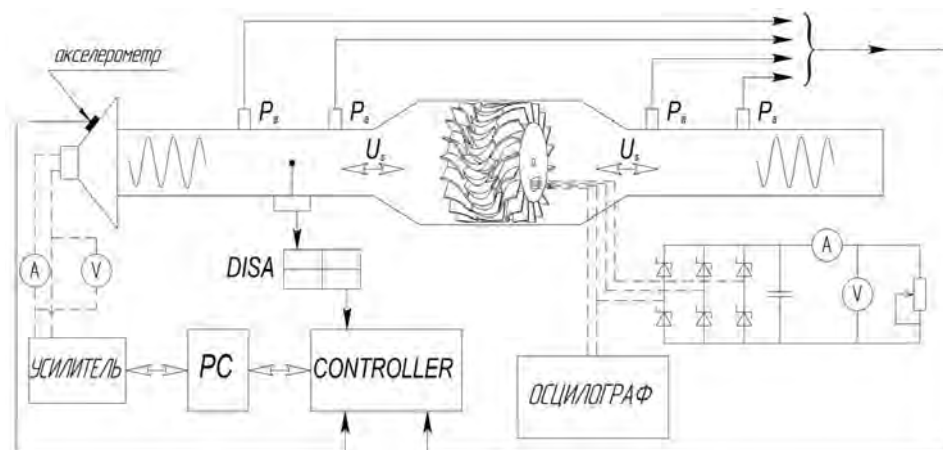


Рисунок 5 – Схема експериментального стенду для дослідження ІДТ

Для визначення цього можливого впливу в системі був передбачений контроль за рухом діафрагми гучномовця, що забезпечував датчик акселерометру типу ADXL 321. Акустична потужність, яка надходила до ІДТ, визначалась модифікованим методом двох датчиків та шляхом прямих вимірювань коливної швидкості та акустичного тиску.

Навантаженням для ІДТ був трьохфазний безколекторний електричний генератор типу Sankyo F2JGL, жорстко з'єднаний з ротором турбіни. Напруга з генератора подавалась на випрямляч, якій був зроблений на діодах Шотки, а після цього – на навантаження лабораторний реостат.

Оберти турбіни визначались допомогою цифрового осцилографу, який був бив підключений до одної з обмоток генератору. Таке підключення дозволяло одночасно контролювати частоту обертання, напругу та форму пульсацій струму. Потужність генератору визначалась шляхом вимірювання напруги та струму в вимірювальній сеті.

Отже, спроектований стенд і його обладнання надало змогу провести комплексі випробування імпульсної турбіни й отримати її зовнішні характеристики в залежності від різних факторів. Перелік контрольованих параметрів наданий в табл. 1.

Таблиця 1 – Перелік контрольованих параметрів на стенді з ІТ

Параметр	Датчик	Інтервал	Прим.
Частота обертання	Обмотка генератору	0-10000	Осцилограф SDS 1074 CFL
Частота звуку	MPXV7007 DP	-7...7 кПа	МКС
Коливна швидкість	DISA зонд	3–20 м/с	термоанемометр
Частота, напруга, струм, фаза	Цифровий мультиметр		Осцилограф SDS 1074 CFL

**Дослідна ІДТ.** Всі елементи ІДТ – ротор турбіни, два направляючих апарати та обтікачі (рис. 6.) були виготовлені методом 3D друку. Попередні розрахунки геометрії елементів ІДТ виконувались згідно з рекомендаціями, що наведені в роботах [7, 8].

Обидва статори ІДТ (направляючі апарати) мають 18 лопатей, ротор має 24 лопаті. Зовнішній діаметр ІДТ становив 70 мм, діаметр ротору – 50 мм.

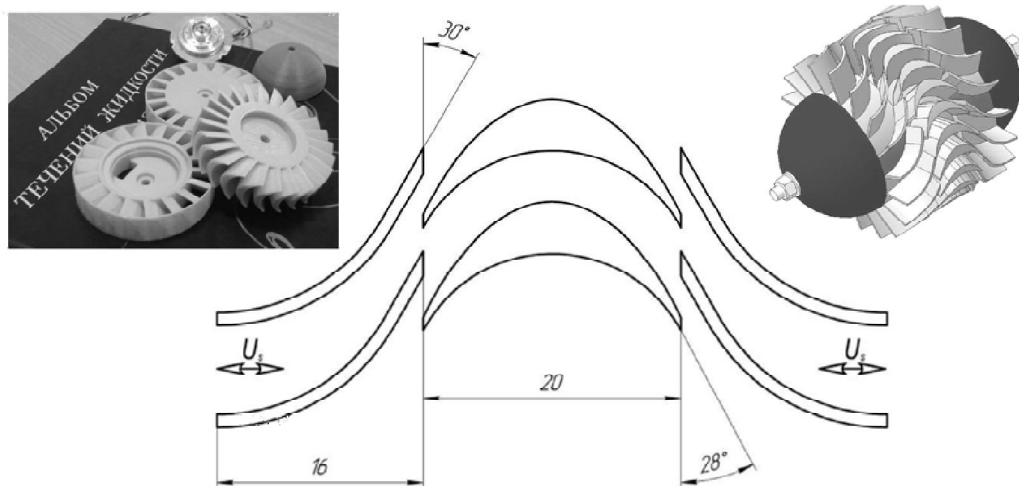


Рисунок 6 – Схема проточної частини ІДТ

**Результати експериментальних досліджень.** У ході досліджень були отримані данні відносно залежності характеристик ІДТ від частоти акустичної хвилі й акустичної потужності. (рис. 7).

На рис. 6а показані результати визначення робочої частоти ІДТ. У ході досліду на гучномовець, за умов підтримки його постійної акустичної потужності, подавався сигнал з різною частотою. На графіку можна бачити, що частота акустичної хвилі суттєво впливає на оберти ІДТ і для даного зразка ІДТ оптимальною частотою є 20 Гц. Досліджувана турбіна проектувалась на роботу з низькими частотами, отже, ці експериментальні данні очікувані та добре корелюються з розрахунками.

Зрозуміло, що важливим чинником є акустична потужність, яка підводиться до турбіни. На рис. 7 б наведені данні, що показують залежність частоти обертання ІДТ від акустичної потужності в резонаторі при різних значеннях навантаження.

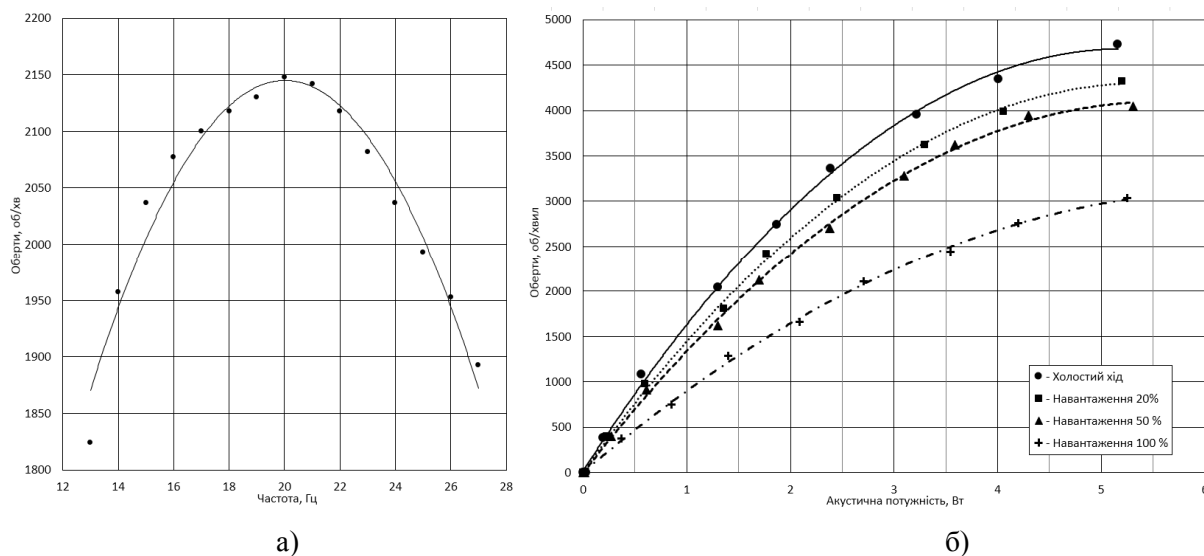


Рисунок 7 – Характеристики ІДТ, (навантаження генератору 100 Ом: а) – визначення оптимальної частоти ІДТ, б) – залежність обертів турбіни від акустичної потужності в резонаторі

Нажаль в якості генератору, що був вмонтований в ІДТ, був використаний безколекторний електричний двигун. Цей двигун незадовільно працював в якості генератора, тому провести дослідження при більшій акустичній потужності не вдалося.

Цікаві результати, показані на рис. 8. У ході дослідів було встановлено, що залежність обертів ІДТ від частоти акустичної хвилі має декілька максимумів, на частотах, кратних основній розрахунковій.

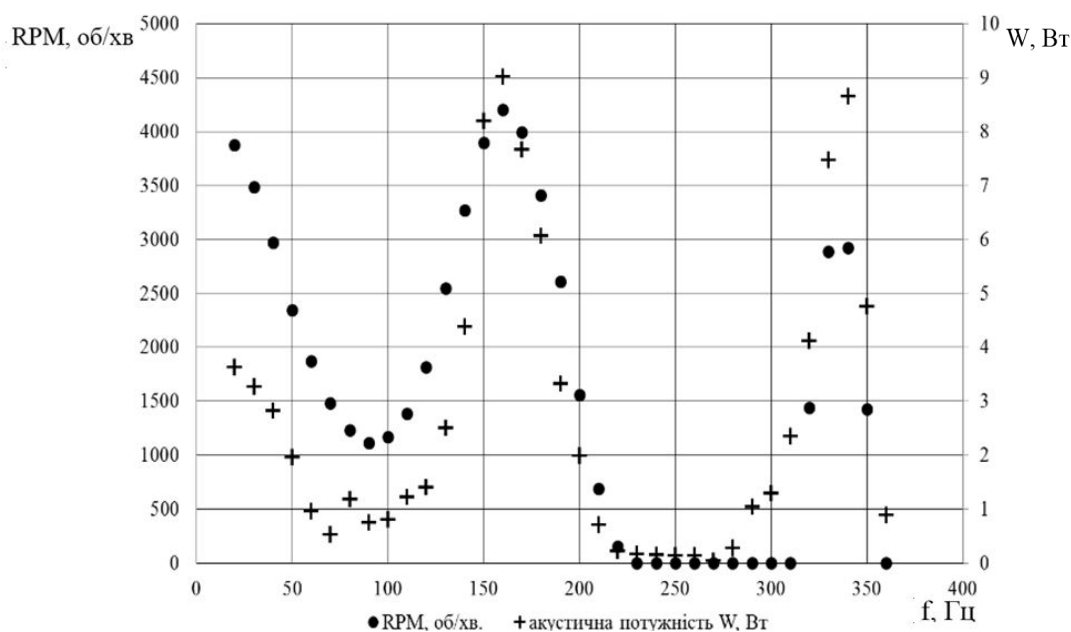


Рисунок 8 – Залежність частоти обертання ІДТ від частоти акустичної хвилі

Так, на частотах 160–170 Гц та 320–340 Гц ІДТ починає набирати оберти, що є неочікуваним результатом, оскільки на цих частотах амплітуда коливного руху  $\zeta$  середовища суттєво менша, ніж на частоті 20 Гц – формула (2). Одночасно маємо також зростання акустичної потужності, що свідчить про наявність резонансних ефектів. Таким чином можна зробити висновок, що для ІДТ амплітуда коливного руху –  $\zeta$  не

є вирішальним параметром, найбільш важливі параметри – це акустичний тиск і коливальна швидкість. А це, в свою чергу, дає можливість проектувати ІДТ і ТАД для більших частот, що суттєво зменшить їх габарити.

Зрозуміло, що за своїми акустичними властивостями дослідний стенд відрізняється від діючого ТАД і в реальних умовах має місце ефект сумування різних чинників. Тому, в подальшому, треба чітко розділити фактори, які пов'язані з конструкцією ІДТ-точність виготовлення, якість поверхней лопатей турбіни та спрямляючого апарату, характеристики електричного генератору та іншими чинниками.

#### **Висновки.**

1. У результаті проведених досліджень підтверджена роботоспроможність запропонованої та виготовленої ІДТ у складі термоакустичної системи.

2. Конструктивні заходи, що до геометричних параметрів резонатору ТАД, дають змогу створити умови для ефективної роботи осьових імпульсних двонаправлених турбін.

3. Показано, що ІДТ може ефективно працювати в широкому діапазоні частот, що дозволяє створювати компактні та потужні системи.

4. Комплекс ТАТМ і генератор з приводом від ІДТ є перспективним технічним рішенням для систем використання скидних і відновлювальних енергетичних ресурсів.

#### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. G. W. Swift Thermoacoustics for liquefaction of natural gas / G. W. Swift and J. J. Wollan // *GasTIPS*, Volume 8, Number 4, pp. 21-26
2. De Blok, K. Low operating temperature integral thermo acoustic devices for solar cooling and waste heat recovery / K. De Blok // *Acoustic-2008*, International conference. – Paris, 2008. – P. 18–24.
3. Robert M. Keolian Truck Thermoacoustic Generator and Chiller. Final Report. DOE Project DE-FC26-04NT42113 CPR/IW Project 17057 // Applied Research Laboratory. The Pennsylvania State University. – 2011. – 190 p.
4. Kees de Blok, Acoustic to electric power conversion / Kees de Blok, Pawel Owczarek, Maurice Francois // *Aster Thermoacoustics-2014*. <http://www.aster-thermoacoustics.com/>
5. Thakker A., Hourigan F. Modeling and scaling of the impulse turbine for wave power applications // *Renewable Energy*. 2004. V. 29, no. 3. P. 305–317
6. Bruno Pereias at all. «An improved radial impulse turbine for OWC» // *Renewable Energy* 36 (2011) 1477-1484.
7. De Blok, K. Bi-directional turbines for converting acoustic wave power into electricity / Kees de BLOK/ <http://www.aster-thermoacoustics.com/>
8. Klopogge T. Turbine design for thermo-acoustic generator: Masters thesis. Aeronautical Engineering, Hogeschool. Holland Delft, 2012. 72 p.
9. Коробко В. В. Числове моделювання суднової термоакустичної системи регазифікації LNG палив / В. В. Коробко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – Херсон : Видавництво ХДМА, 2015. – № 2 (13). – С. 36–42.
10. Ward B. Design Environment for Low-amplitude Thermoacoustic Energy Conversion / B. Ward, J. Clark, G. Swift // Los Alamos National Laboratory. – 2008. – 282 p.

#### **REFERENCES**

1. Swift G. W. & Wollan J. J. Thermoacoustics for liquefaction of natural gas / // *GasTIPS*, Volume 8, Number 4, 21-26
2. De Blok, K. (2008). Low operating temperature integral thermo acoustic devices for solar cooling and waste heat recovery. *Acoustic-2008, International conference*. Paris, 18–24.
3. Robert M. (2011). Keolian Truck Thermoacoustic Generator and Chiller. Final Report. DOE Project DE-FC26-04NT42113 CPR/IW Project 17057. *Applied Research Laboratory. The Pennsylvania State University*.

4. Kees de Blok, Acoustic to electric power conversion/ Kees de Blok, Pawel Owczarek, Maurice Francois, // Aster Thermoacoustics-2014. <http://www.aster-thermoacoustics.com/>
5. Thakker A., Hourigan F. Modeling and scaling of the impulse turbine for wave power applications // Renewable Energy. 2004. V. 29, no. 3. P. 305–317
6. Bruno Pereias et al. «An improved radial impulse turbine for OWC». // Renewable Energy 36 (2011) 1477-1484.
7. De Blok, K. Bi-directional turbines for converting acoustic wave power into electricity // [Text] / Kees de BLOK/ <http://www.aster-thermoacoustics.com/>
8. Klopogge T. Turbine design for thermo-acoustic generator: Masters thesis. Aeronautical Engineering, Hogeschool. Holland Delft, 2012. 72 p.
9. Korobko V.V. Chyslove modelyuvannya sudnovoyi termoakustychnoyi systemy rehazyfikatsiyi LNG palyv // Naukovyy visnyk Khersons'koyi derzhavnoyi mors'koyi akademiyi. – Kherson : Vydavnytstvo KhDMA, 2015. – # 2 (12). – S. 36-42
10. Ward B. Design Environment for Low-amplitude Thermoacoustic Energy Conversion / B. Ward, J. Clark, G. Swift // Los Alamos National Laboratory. – 2008. – 282 p.

**Коробко В. В., Московко А. А., Воронов И. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ДВУНАПРАВЛЕННЫХ ТУРБИН В ТЕРМО-АКУСТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ МАШИНАХ**

*Создание эффективных систем использования низкотемпературных источников тепловой энергии является важной задачей для энергетики, промышленности, транспорта, флота. Совершенствование тепловых двигателей усложняет тенденцию снижения температурного уровня сбросной теплоты. Внедрение LNG топлив добавляет так называемые «криогенные» тепловые ресурсы систем регазификации сжиженного газа. Термоакустической технологии потенциально способны обеспечить возможности утилизации таких низкотемпературных тепловых ресурсов. Внедрению этих технологий мешает сложность непосредственного получения электрической энергии от термоакустических двигателей. Использование пьезопреобразователей и линейных электрических генераторов приводит к росту стоимости таких систем, ограничивает их мощность и ухудшает надежность. Использование импульсных двунаправленных турбин (ИДТ) должно способствовать решению этой проблемы. С помощью программы DELTA EC проведены варианты расчеты термоакустического двигателя (ТАД) с циклом Брайтона. В результате конструкция ТАД была оптимизирована для использования ИДТ. В работе исследованы характеристики опытного образца ИДТ, предоставлено описание экспериментального стенда, приведены результаты экспериментальных исследований, определены направления дальнейшей работы.*

**Ключевые слова:** импульсная двунаправленная турбина, вторичные энергетические ресурсы, термоакустика, тепловые машины

**Korobko V. V., Moskovko O. O., Voronov I. V. INVESTIGATION USE OF FEATURES OF PULSE BIDIRECTIONAL TURBINE IN THERMOACOUSTIC HEAT MACHINES**

*Annotation.* Creating effective use of low temperature heat sources is an important task for the energy, industry, transport. Improving the thermal engine causes permanent reduction of the temperature level of waste heat. The introduction of LNG fuels adds so-called «cryogenic» thermal resources, system of regasification of LNG. Thermoacoustic technology is potentially able to provide the possibility of use of low temperature waste heat resources. Implementation of these technologies prevents the serious problem of direct production of electric energy from the thermoacoustic engine. Using piezoelectric transducer and linear electric generators increases the cost of such systems, create limits of their capacity, and degrades reliability. The introduction of bidirectional impulse turbines should help solve the problem. With program DELTA EC conducted variant calculations thermoacoustic engine (TAD) with the cycle of Brighton. As a result TAD design has been optimized for use bidirectional impulse turbines. In this work the parameters of BIT sample questionnaire, provided a description of the experimental stand, given the results of experimental studies of mental-identified areas for further work.

**Keywords:** bidirectional impulse turbine, waste energy, thermoacoustic, thermal machines.