

УДК 621.517.4-71.01

doi: 10.32620/reks.2021.1.06

Д. В. КОНОВАЛОВ¹, Р. М. РАДЧЕНКО¹, Г. О. КОБАЛАВА¹,
С. Г. ФОРДУЙ², В. П. ХАЛДОБІН¹

¹ Національний університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

² PepsiCo, Inc., CTS ESSA, Київ, Україна

Національний університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ НА ОСНОВІ ТЕРМОПРЕСОРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Найбільш поширеним напрямом збільшення потужності та скорочення споживання палива сучасними енергетичними установками є контактне охолодження газового або повітряного потоку упорскуванням води. Перспективним розвитком цього напрямку є застосування термопресорних технологій, а саме використання теплоти, стисненого компресорами енергетичної установки, повітря для прискорення потоку до швидкості близької звуковій і практично миттєвого (при мінімальній протяжності та впливі аеродинамічного опору) випаровування упорскуваної води (ефект термогазодинамічної компресії). При розробці таких технологій вкрай важливим є визначення раціональних параметрів організації теплофізичних і гідродинамічних процесів із відповідною розробкою конструкції проточної частини апарату та спеціального програмного продукту. Для цього необхідно також використовувати методи та засоби для визначення оптимальних робочих параметрів теплоутилізаційних систем енергетичних установок. В роботі представлені блок-схема та алгоритм раціональної методики проектування термопресорів. Програмний продукт, розроблений на їх основі дозволяє забезпечити точне визначення ефективності застосування термопресора у складі енергетичної установки для охолодження циклового повітря з урахуванням особливостей робочих режимів в проточній частині, а також при різних кліматичних умовах експлуатації. Програмний комплекс також дозволяє розрахувати характеристики обладнання або системи і схемо-конструктивних рішень при застосуванні у складі енергетичної установки: електрогенератора; тепловикористовуючих холодильних машин (ежекторні холодильні машини, абсорбційні холодильні машини); турбогенератора або парогенератора у складі тригенераційної установки або у складі турбокомпаундної установки (енергетичні установки морських суден); утилізаційного котла одного або двох тисків. Моделювання роботи термопресорної системи охолодження дозволяє виявити ефективність застосування такої системи у складі енергетичної установки та порівняти її з традиційними способами охолодження і зволоження циклового повітря.

Ключові слова: програмний комплекс; термопресор; компресор; дисперсність; проточна частина; енергетична установка.

Вступ

Підвищення потужності енергетичних установок на базі теплових двигунів здійснюється шляхом збільшення витрати робочого тіла [1, 2] та корисної роботи розширення продуктів згоряння [3, 4] з одночасним зменшенням її витрати на стискання повітря [5, 6]. Це досягається охолодженням повітря [7, 8] та глибокою утилізацією енергії продуктів згоряння [9, 10], що забезпечує зменшення питомої витрати палива і підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) [11, 12].

Поширеним напрямом збільшення потужності та скорочення споживання палива є контактне охолодження газового або повітряного потоку упорскуван-

ням води. Однак, для такого способу характерна значна протяжність зони випаровування, що конструктивно не завжди можливе і призводить до втрат потужності двигуна через аеродинамічний опір.

Подальшим розвитком напрямку є використання теплоти стисненого повітря для прискорення потоку до близької звуковій швидкості, що призводить до практично миттєвого (при мінімальній протяжності та аеродинамічному опорі) випаровування упорскуваної води (ефект термогазодинамічної компресії) (рис. 1). Застосування таких термопресорних технологій вимагає розробки програмного комплексу для проектування систем проміжного охолодження циклового повітря двигуна енергоустановки термопресорами, який дозволить визначати раціональні параме-

три робочих режимів в їх проточній частині та автоматизувати розрахунок характеристик енергоустановки на часткових режимах і при змінних кліматичних умовах.

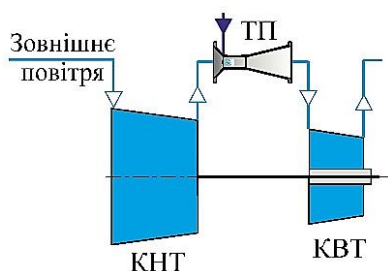


Рис. 1. Схема проміжного охолодження повітря застосуванням термопресора: КНТ – компресор низького тиску; КВТ – компресор високого тиску; ТП – термопресор.

1. Аналіз проблеми і постановка мети та задач дослідження

При проектуванні струминних апаратів в край важливим є визначення раціональних параметрів організації робочих процесів із відповідною розробкою конструкції проточної частини [13, 14]. При розробці відповідного програмного продукту необхідно застосовувати методи та засоби для визначення оптимальних робочих параметрів теплоутилізаційних систем енергетичних установок [15, 16].

Слід зазначити, що термопресор дозволяє компенсувати втрати тиску і зменшити роботу на стиснення в компресорі та збільшити витрату робочого тіла та відповідно підвищити потужність ГТД [17, 18]. Окрім того, термопресор є компактним, конструктивно і технологічно простим у виробництві в порівнянні із поверхневими повітроохолоджувачами [19, 20].

Розгляд роботи термопресора, проведений в [21], показує, що при русі паро-газорідинної суміші в секції випаровування можна виділити три характерні режими: режим I – вплив опору крапель рідини переважає над позитивним ефектом випаровування і визначає поведінку газового потоку; режим II – інтенсивне випаровування рідини; режим III – поверхневе тертя стає переважаючим чинником.

Робочий процес термопресора бажано організувати так, щоб звести до мінімуму втрати енергії в режимі I і повністю виключити режим III (див. рис. 1) [19]. Режим II повинен закінчуватися на виході з камери випаровування або в проточній частині дифузору. В дифузорі відбувається зниження швидкості парогазової суміші і підвищення статичного тиску. Важливо, щоб цей процес відбувався при мінімальному аеродинамічному опорі.

На загальне повне підвищення тиску газового потоку в термопресорі суттєво впливають втрати тиску через гідравлічний опір в елементах проточної частини термопресора (конфузор, камера випаровування, дифузор) [21].

Втрати тиску в проточній частині термопресора залежать, насамперед, від характеру робочого режиму. В термопресорі процес прискорення газового потоку до навіколозвучової швидкості ($0,5 \dots 0,9$ М) відбувається в конфузорі. В приймальну камеру, що розташована до конфузора подається рідина за допомогою форсунки або інших спеціальних пристроїв [11, 22]. В камері випаровування відбуваються тепломасообмінні та гідродинамічні процеси взаємодії потоків газу і рідини, і, як наслідок, відбувається розгін, дроблення, підігрів і випаровування крапель, а також охолодження газу [19].

Для визначення втрат тиску в термопресорі застосовують класичні методики. Ці методики ґрунтовані на визначенні аналітичним шляхом коефіцієнтів місцевого опору і тертя кожного з елементів термопресора. Втрати тиску через лобовий опір (розгін або гальмування краплі) можна визначити за коефіцієнтом аеродинамічного опору $\zeta_{кр}$ краплі в потоці відповідно до методики, що запропонована в роботі [19]. Втрати тиску в камері випаровування $\zeta_{кв}$ можна визначити за класичним рівнянням Блазіуса при течії в каналах [20, 23]. Для розрахунку втрат від загального опору для конфузора та дифузора використовують рівняння для коефіцієнтів місцевих втрат $\zeta_{к}$, $\zeta_{д}$ [23].

Застосування наведених методик розрахунку втрат по елементам проточної частини термопресора дає досить часто занижені результати. Це пов'язано, насамперед, із складністю врахування робочих режимів течії термопресора.

Ще складнішим є визначення втрат через лобовий опір краплі в конфузорі та на початковій ділянці камери випаровування, внаслідок складності у точному визначенні початкової швидкості краплі, її діаметра та ін. Експериментально визначено, що такі втрати можуть сягати $10 \dots 20$ % [20], але методики проектування для точного визначення таких втрат для термопресора відсутні.

До недоліків існуючих методик розрахунку робочих процесів термопресора у складі системи охолодження циклового повітря енергоустановки слід віднести трудомісткість розрахунків, що виконуються, і складність роботи з великим об'ємом даних кліматичних та гідрометеорологічних умов.

Розробка раціональної методики проектування термопресорів та програмного продукту на її основі дозволить забезпечити точне визначення ефективності застосування термопресора у складі енергоустановки за різних робочих режимів, а також в різних кліматичних умовах експлуатації.

Мета дослідження – розробка програмного комплексу раціонального проектування систем на основі термопресорних технологій для проміжного охолодження циклового повітря двигуна енергоустановки з урахуванням особливостей робочих режимів в проточній частині.

2. Результати дослідження

В ході дослідження розроблено програмний комплекс раціонального проектування систем проміжного охолодження для енергетичних установок на базі газотурбінних двигунів (ГТД) і двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Розроблений комплекс складається з декількох підсистем:

- 1) підсистема "Термопресор" – розрахунок робочих характеристик термопресора та їх зміна в проточній частині з урахуванням особливостей упорскування води;
- 2) підсистема "Двигун" – розрахунок характеристик теплового двигуна енергоустановки із врахуванням контактного охолодження циклового повітря;

3) підсистема "Кліматичні дані" – призначена для зберігання та надання іншим підсистемам даних відносно повітря на вході;

4) підсистема "Енергетична установка" – розрахунок паливно-енергетичних характеристик енергоустановки.

Для реалізації методики проектування в програмному комплексі була розроблена блок-схема алгоритму розрахунку (рис. 2).

Розглянемо більш детально кожну із підсистем окремо.

Підсистема "Термопресор". Дає можливість детального розрахунку робочих параметрів термопресора в усіх основних елементах проточної частини. Підсистема складається з наступних функціоналів (розділів): встановлення діапазону розрахунку за робочими температурами; вибір робочого тіла (повітря, газ, холодоагенти); параметри рідини, що упорскується; параметри вологого газу (пари) на вході в приймальну камеру; геометричні характеристики проточної частини; запис розрахованих даних в таблиці; візуалізація розрахунків у вигляді графіків (рис. 3).

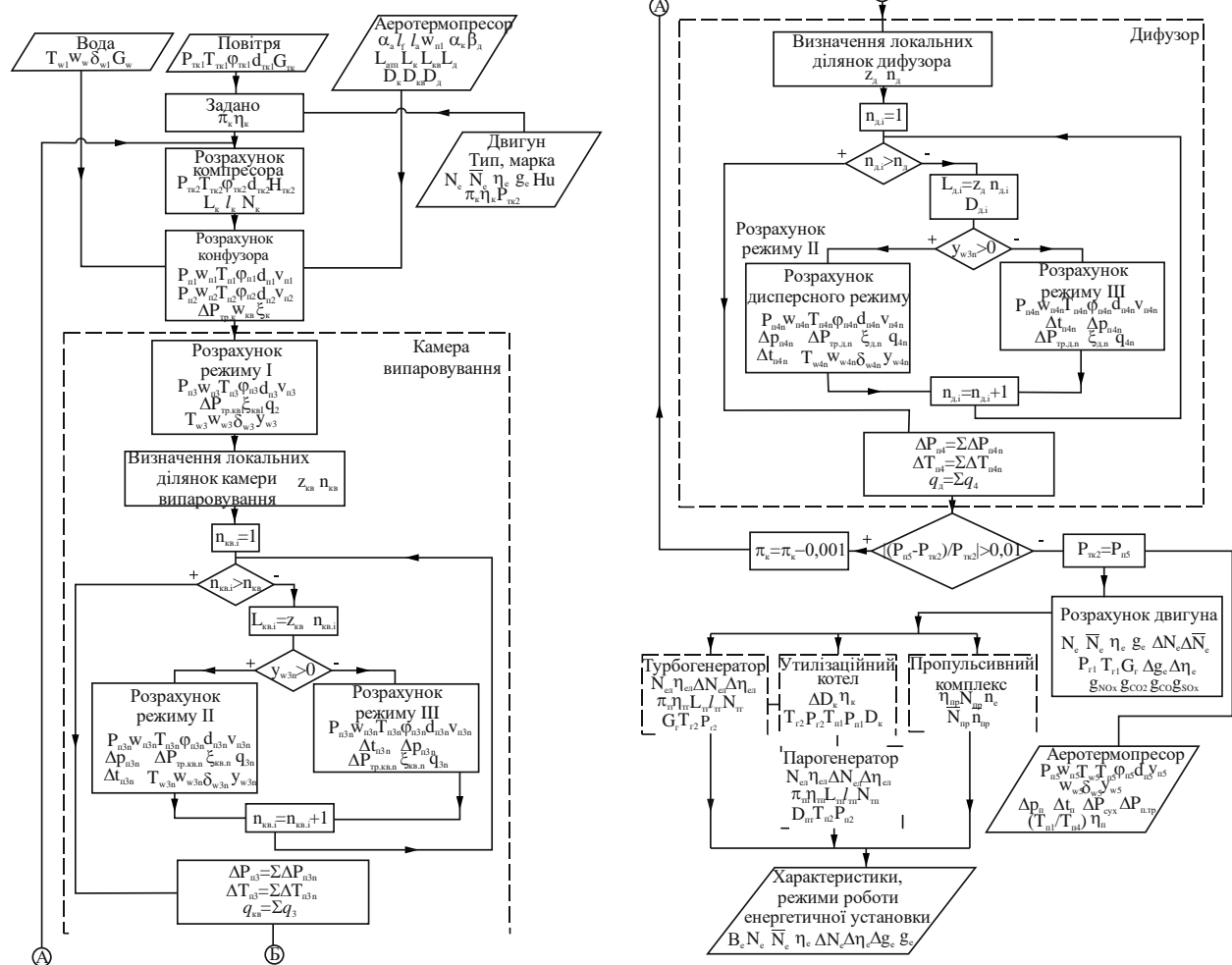


Рис. 2. Блок-схема алгоритму

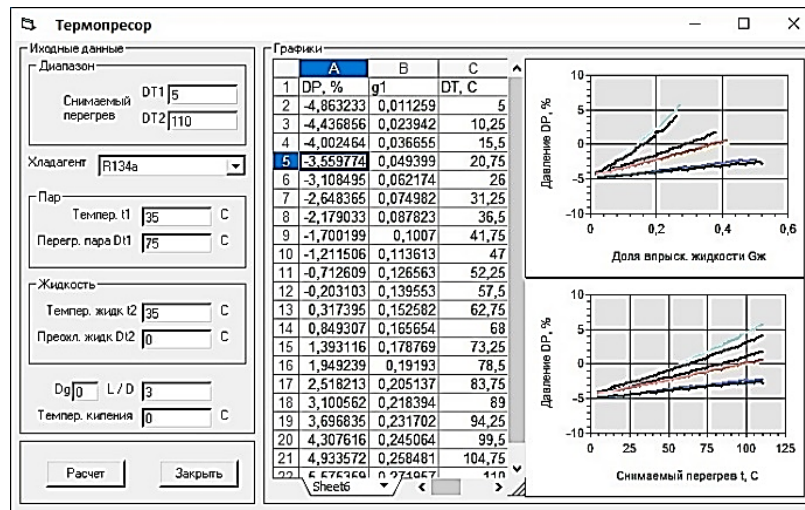


Рис. 3. Підсистема "Термопресор"

Вхідними даними для розрахунку термопресорної системи охолодження є (рис. 2, 3): параметри рідини (води), що упорскується (температура T_{w1} , швидкість на виході з форсунки w_w , масова витрата G_w , початковий діаметр краплі δ_{w1}); параметри вологого газу (тиск P_{n1} , температура T_{n1} , відносна вологість ϕ_{n1} , вологовміст d_{n1} , масова витрата G_{n1} , початкова швидкість w_{n1}); параметри термопресора (геометрія проточної частини – кут конусності конфузора α_k , дифузора β_k , діаметр камери випаровування D_{kv} , довжина камери випаровування L_{kv} , конфузора L_k , дифузора L_d і відносна їх довжина l_{kv} , l_k , l_d , задана швидкість на вході в камеру випаровування $w_{kv1} < M = 1$); робочі параметри і характеристики двигуна (потужність N_e , N_n , ККД η_e , питома витрата палива g_e , марка палива тощо).

Відповідно до наведеної блок схеми, передусім проводиться розрахунок робочого процесу стиснення. Розраховуються: тиск P_{tk2} , температура T_{tk2} , відносна вологість ϕ_{tk2} , вологовміст d_{tk2} , ентальпія h_{tk2} , робота L_k , l_k , яка втрачається на стиснення, потужність компресорної ступені N_k .

Розрахунок конфузора дозволяє визначити параметри вологого газу на виході (вході в камеру випаровування): тиск P_{n1} , P_{n2} ; температуру T_{n1} , T_{n2} ; швидкість краплі (крапель) w_8 ; швидкість вологого газу w_{n1} , w_{n2} (або відносна швидкість краплі відносно швидкості газу (w_w/w_{n1})); відносну вологість ϕ_{n1} , ϕ_{n2} , вологовміст d_{n1} , d_{n2} , питомий об'єм v_{n1} , v_{n2} (або густину ρ_{n1} , ρ_{n2}). Також визначаються втрати тиску повітря через вплив тертя, місцевого опору, а також втрат, які пов'язані із лобовим опором крапель (режим I) в потоці газу ΔP_k , ξ_k .

Розрахунок камери випаровування термопресора здійснюється із врахуванням режимів I, II і III. Проточна частина камери випаровування розбива-

ється на короткі ділянки (чим більше кількість ділянок, тим більш точним буде розрахунок). Визначаються параметри локальних ділянок камери випаровування: кількість n_{kv} і довжина z_{kv} , а також ділянка, де має місце перехід до дисперсного режиму течії (найбільш характерний режим). На кожному кроці розрахунку перевіряють загальну довжину камери випаровування, а також відносну вологість газу u_{n3} (або ступінь сухості x_{n3}). Якщо $u_{n3} = 0$, то розрахунок ведуть відповідно режиму III. При $u_{n3} > 0$ розрахунок здійснюється відповідно до режиму II.

Розрахунок ведуть з урахування можливості виникнення режиму III та припинення охолодження потоку у випадку, коли відносна вологість газу ϕ_{n3} стає рівною 100 %. Параметри, які розраховуються на даному етапі: тиск P_{n3} ; температура T_{n3} ; зменшення температури газу ΔT_{kv} ; відносна температура T_{n2}/T_{n3} ; швидкість вологого газу w_{n3} ; відносна вологість ϕ_{n3} ; вологовміст d_{n3} ; питомий об'єм v_{n3} (або густина ρ_{n3}); падіння тиску $\Delta P_{tr,kv}$; підвищення тиску в наслідок термогазодинамічної компресії $\Delta P_{атп3}$; діаметр краплі (або її зменшення) δ_{w3} ; масова витрата рідини, що не випарилася G_{w3} ; кількість теплоти, що відведено від потоку (теплове навантаження) q_{kv} .

Наступним кроком є розрахунок дифузора термопресора з урахуванням режимів II і (або) III. Проточна частина дифузора також розбивається на короткі ділянки. Визначаються параметри локальних ділянок дифузора: кількість n_d і довжина z_d . На кожному кроці розрахунку перевіряють загальну довжину дифузора і діаметри входу і виходу з кожної локальної ділянки, а також відносну вологість газу u_{n3} (або ступінь сухості x_{n3}). Якщо $u_{n3} = 0$, то розрахунок ведуть відповідно режиму III. При $u_{n3} > 0$ розрахунок здійснюється відповідно до режиму II.

На кінцевому етапі розрахунку, в залежності від умов застосування термопресора, перевіряють умову

щодо забезпечення кінцевого тиску на виході з термопресора $P_{н4}$ і порівнюють тиск із заданим. У разі необхідності ступінь стиснення π_k компресорної ступені двигуна змінюють (зменшують) і розрахунок повторюють, доки кінцевий тиск не буде становити необхідне значення для входу в компресорний ступінь. Перевіряють значення діаметру краплі на виході відповідно до заданого значення (для компресорів сучасних ГТД і ДВЗ значення діаметру не повинно перевищувати 20...25 мкм).

Після розрахунку робочих процесів в термопресорі, за відомими методиками [24–26] розраховують робочий цикл (в залежності від типу двигуна енергетичної установки) та характеристики із визначенням потужності N_e , ККД η_e , питомої витрати палива g_e із врахуванням часткових режимів та кліматичних умов.

Алгоритм методики проектування систем на основі термопресорів використовує загальновідомі теплофізичні та гідродинамічні залежності [23, 27–30] та складається з декількох етапів.

1. Вибір способу упорскування. Установка форсунок можлива по вісі проточної частини або декілька форсунок розташованих діаметрально і направлених під кутом до основної вісі проточної частини приймальної камери. Організовувати упорскування потрібно в приймальній камері, тобто до конфузора. Таке рішення забезпечить підготовку дисперсного потоку: вирівнюються швидкості крапель рідини потоку газу; напрям вектору швидкості крапель буде співпадати із напрямом вісі проточної частини камери випаровування; завдяки додатковій турбулізації потоку буде забезпечено додаткове дроблення крапель в проточній частині конфузора; у випадку упорскування кількості рідини більше понад необхідну для випаровування є можливість забезпечити зменшення втрат тиску на аеродинамічний опір.

Така підготовка дозволяє уникнути втрат тиску на режимі І, коли переважає лобовий опір краплі при русі у потоці газу, а також зменшити втрати тиску через тертя дисперсного потоку о внутрішні стінки проточної частини камери випаровування.

2. Визначення початкової відносної швидкості в камері випаровування \bar{w}_w .

3. Розрахунок загальних втрат тиску в проточній частині термопресора.

4. Визначення діаметру краплі наприкінці процесу випаровування до насичення газу (повітря) до $\varphi_2 = 100\%$.

5. Визначення довжини ділянки випаровування при насиченні газу (повітря) до стану при $\varphi_2 = 100\%$.

6. Визначення відносного підвищення тиску в термопресорі.

Підсистема "Двигун". Дозволяє розраховувати параметри теплових двигунів із врахуванням контактного проміжного охолодження циклового повітря між ступенями компресорів (рис. 4). При цьому обов'язковим є обирання схеми встановлення термопресора на лінії стиснення повітря.

Підсистема "Кліматичні дані". Відповідає за внесення і зберігання статистичних даних щодо кліматичних умов під час експлуатації енергоустановки. Дані можуть бути виведені в табличній формі в файлах програми Excel. За запитом вони надаються іншим підсистемам.

Підсистема "Енергетична установка". Призначена для розрахунку та порівняння паливно-енергетичних характеристик енергоустановок (рис. 5). Розрахунок може здійснюватися для ряду установок, в т.ч. для газотурбінних установок (простий та регенеративний цикл, цикл із перерозширення продуктів згоряння інш.) і дизельних суднових установок (на основі мало- та середньооборотних дизелів, з та без врахування рециркуляції продуктів згоряння).

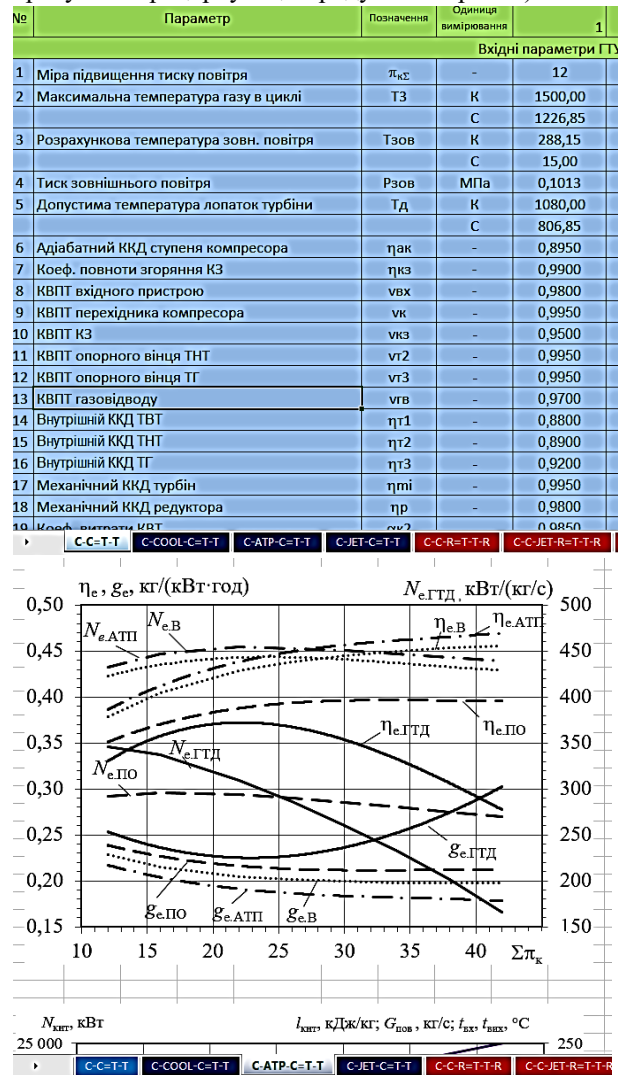


Рис. 4. Підсистема "Двигун".

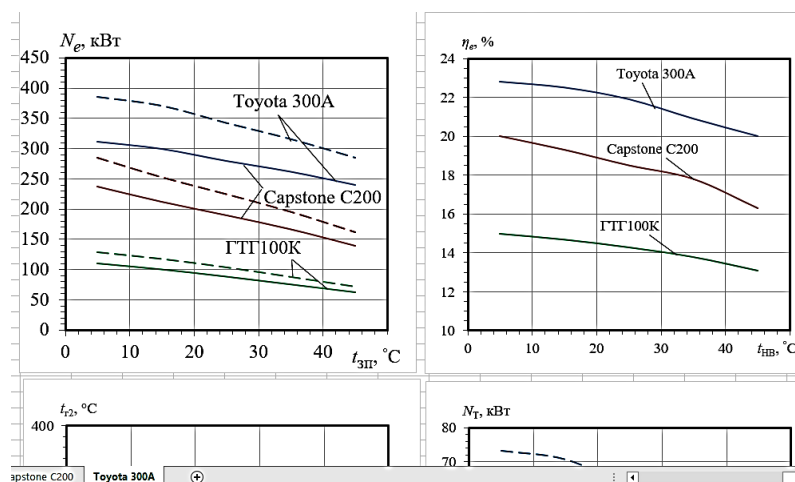


Рис. 5. Підсистема "Енергетична установка"

Також програмний комплекс дозволяє розрахувати характеристики обладнання або систем і схи-мо-конструктивних рішень при застосуванні у складі енергетичної установки: електрогенератора (на базі ДВЗ або ГТД); тепловикористовуючих холодильних машин (ежекторна холодильна машина, абсорбційна холодильна машина); турбогенератора або парогенератора у складі тригенераційної установки (стаціонарні установки) або у складі турбокомпаундної установки (енергетичні установки морських суден); утилізаційного котла одного або двох тисків; пропульсивного комплексу суднової енергетичної установки. Моделювання роботи термопресорної системи охолодження дозволяє виявити ефективність застосування такої системи у складі енергетичної установки та порівняти її із традиційними способами охолодження і зволоження циклового повітря.

Програмний комплекс застосовано при розробці та аналізі ефективності систем контактного охолодження циклового повітря на прикладі ГТД RW-21, LM6000 (General Electric), LMS100 (General Electric), мікротурбін фірм Toyota, Capstone, а також суднових енергоустановок з мало- та середньообертовими двигунами фірм Wartsila і MAN B&W.

Висновки

Розроблено програмний комплекс раціонального проектування термопресорних систем охолодження ГТД і ДВЗ, який враховує неповне випаровування упорскуваної рідини, дозволяє визначати локальну дисперсність крапель у проточній частині термопресора і раціональні параметри процесів.

Комплекс забезпечує визначення ефективності роботи термопресора за різних режимів і кліматичних умов експлуатації та паливно-енергетичної ефективності енергоустановок на базі ГТД і ДВЗ.

Напрямок подальшого розвитку програмного комплексу є розробка його підсистем з визначення екологічних показників енергоустановок з термопресорами, що сприятиме розширенню їх застосування.

Література

1. *Increasing the efficiency of gas turbine inlet air cooling in actual climatic conditions of Kazakhstan and Ukraine [Text]* / A. Radchenko, N. Radchenko, A. Tsoy, B. Portnoi, S. Kantor // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – Vol. 2285, Iss. 1. – Article Id: 030071. DOI: 10.1063/5.0026787.
2. *Innovative turbine intake air cooling systems and their rational designing [Text]* / A. Radchenko, E. Trushliakov, K. Kosowski, D. Mikielwicz, M. Radchenko // *Energies*. – 2020. – Vol. 13, iss. 23. – Article Id: 6201. DOI: 10.3390/en13236201.
3. *Efficient ship engine cyclic air cooling by turbo-expander chiller for tropical climatic conditions [Text]* / M. Radchenko, D. Mikielwicz, A. Andreev, S. Vanyeyev, O. Savenkov // *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering* – 2020. LNNS. – 2021. – Vol. 188. – P. 498-507. DOI: 10.1007/978-3-030-66717-7_42.
4. *Monitoring the efficiency of cooling air at the inlet of gas engine in integrated energy system [Text]* / A. Radchenko, I-C. Scurtu, M. Radchenko, S. Forduy, A. Zubarev // *Thermal Science*. – 2020. – P. 344. DOI: 10.2298/TSCI200711344R.
5. *Monitoring the Fuel Efficiency of Gas Engine in Integrated Energy System [Text]* / A. Radchenko, D. Mikielwicz, S. Forduy, M. Radchenko, A. Zubarev // *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering*. AISC. – 2020. – Vol. 1113. – P. 361-370. DOI: 10.1007/978-3-030-37618-5_31.
6. *Підвищення ефективності охолодження повітря на вході ГТД холодильними машинами шляхом акумуляції холоду [Текст]* / А. М. Радченко, Б. С. Портной, С. А. Кантор, О. І. Пряко, І. В. Калініченко // *Авіаційно-космічна техніка і*

технологія. – 2020. – № 4(164). – С. 22-27. DOI: 10.32620/aktt.2020.4.03.

7. Increasing the Operation Efficiency of Air Conditioning System for Integrated Power Plant on the Base of Its Monitoring [Text] / E. Trushliakov, A. Radchenko, S. Forduy, A. Zubarev, A. Hrych // *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering*. AISC. – 2020. – Vol. 1113. – P. 351-360. DOI: 10.1007/978-3-030-37618-5_30.

8. Increasing the Operation Efficiency of Railway Air Conditioning System on the Base of Its Simulation Along the Route Line [Text] / M. Radchenko, R. Radchenko, V. Tkachenko, S. Kantor, E. Smolyanoy // *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering*. AISC. – 2020. – Vol. 1113. – P. 461-467. DOI: 10.1007/978-3-030-37618-5_39.

9. Improving the efficiency of heat recovery circuits of cogeneration plants with combustion of water-fuel emulsions [Text] / V. Kornienko, M. Radchenko, R. Radchenko, D. Konovalov, A. Andreev, M. Pyrysunko // *Thermal Science*. – 2021. – Vol. 25 (1B). – P. 791-800. DOI: 10.2298/TSCI200116154K.

10. Characteristics of the Rotary Cup Atomizer Used as Afterburning Installation in Exhaust Gas Boiler Flue [Text] / V. Kornienko, R. Radchenko, D. Konovalov, A. Andreev, M. Pyrysunko // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. LNME. – 2020. – P. 302-311. DOI: 10.1007/978-3-030-50491-5_29.

11. Optimal Sizing of the Evaporation Chamber in the Low-Flow Aerothermopressor for a Combustion Engine [Text] / D. Konovalov, H. Kobalava, M. Radchenko, V. Sviridov, I. C. Scurtu // *Advanced Manufacturing Processes II*. InterPartner 2020. LNME. – 2021. – P. 654-663. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5_63.

12. An innovative air conditioning system for changeable heat loads [Text] / E. Trushliakov, M. Radchenko, T. Bohdal, R. Radchenko, S. Kantor // *Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes*. InterPartner 2019. LNME. – 2020. – P. 616-625. DOI: 10.1007/978-3-030-40724-7_63.

13. The Efficiency of Refrigeration Capacity Regulation in the Ambient Air Conditioning Systems [Text] / E. Trushliakov, A. Radchenko, M. Radchenko, S. Kantor, O. Zielikov // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. LNME. – 2020. – P. 343-353. DOI: 10.1007/978-3-030-50491-5_33.

14. Improvement of the Refrigeration Capacity Utilizing for the Ambient Air Conditioning System [Text] / A. Radchenko, E. Trushliakov, V. Tkachenko, B. Portnoi, O. Priadko // *Advanced Manufacturing Processes II*. InterPartner 2020. LNME. – 2020. – P. 714-723. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5_69.

15. Прохорова, О. М. Ж. Л. Лагранж как один из основоположников теории экстремумов функций многих переменных [Текст] / О. М. Прохорова // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2020. – № 1(93). – С. 103-111. DOI: 10.32620/reks.2020.1.10.

16. Кононенко, И. В. Информационная система выбора и формирования подхода к управлению проектом [Текст] / И. В. Кононенко, С. Ю. Луценко //

Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2020. – № 2(94). – С. 109-118. DOI: 10.32620/reks.2020.2.10.

17. Jonsson, M. Humidified gas turbines – a review of proposed and implemented cycles [Text] / M. Jonsson, J. Yan // *Energy*. – 2005. – No. 30. – P. 1013-1078. DOI: 10.1016/j.energy.2004.08.005.

18. Sexton, W. R. The Effects of Wet Compression on Gas Turbine Engine Operating Performance [Text] / W. R. Sexton, M. R. Sexton // *Proceedings of GT2003 ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air 2009*, Atlanta, Georgia, USA. – 2009. DOI: 10.1115/GT2003-38045.

19. Fowle, A. An experimental investigation of an aerothermopressor having a gas flow capacity of 25 pounds per second [Text] : Dissertation / A. Fowle. – Massachusetts Institute of Technology, USA. 1972.

20. Shapiro, A. H. The Aerothermopressor – a Device for Improving the Performance of a Gas-Turbine Power Plant [Text] / A. H. Shapiro, K. R. Wadleigh // *Proceedings of the Trans. ASME*. – Cambridge, USA, 1956. – P. 617-653.

21. Determination of hydraulic resistance of the aerothermopressor for gas turbine cyclic air cooling [Text] / D. Konovalov, H. Kobalava, M. Radchenko, I. C. Scurtu, R. Radchenko // *9th International Conference on Thermal Equipments, Renewable Energy and Rural Development 2020, E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 180. – Article Id: 01012. – 14 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202018001012.

22. Experimental research of the excessive water injection effect on resistances in the flow part of a low-flow aerothermopressor [Text] / D. Konovalov, H. Kobalava, V. Maksymov, R. Radchenko, M. Avdeev // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. LNME. – 2000. – P. 292-301. DOI: 10.1007/978-3-030-50491-5_28.

23. Oh, H. W. *Advanced Fluid Dynamics* [Text] / H. W. Oh. – Rijeka, Croatia, 2012. – 282 p.

24. Methods to determine a design cooling capacity of ambient air conditioning systems in climatic conditions of Ukraine and Kazakhstan [Text] / N. Radchenko, E. Trushliakov, A. Radchenko, A. Tsoy, O. Shchesiuk // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – Vol. 2285, Iss. 1. – Article Id: 030074. DOI: 10.1063/5.0026790.

25. Improving the efficiency of railway conditioners in actual climatic conditions of operation [Text] / N. Radchenko, A. Radchenko, A. Tsoy, D. Mikielwicz, S. Kantor, V. Tkachenko // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – Vol. 2285, Iss. 1. – Article Id: 030072. DOI: 10.1063/5.0026789.

26. Radchenko, N. I. On reducing the size of liquid separators for injector circulation plate freezers [Text] / N. I. Radchenko // *International Journal of Refrigeration*. – 1985. – Vol. 8, no. 5. – P. 267-269.

27. Statistical Approach to Improve the Efficiency of Air Conditioning System Performance in Changeable Climatic Conditions [Text] / E. Trushliakov, M. Radchenko, A. Radchenko, S. Kantor, Y. Zongming // *5th International Conference on Systems and Informatics*. – 2019. – P. 256-260. DOI: 10.1109/ICSAI.2018.8599434.

28. *Modelling and experimental analysis of shear-slitting process of light metal alloys using FEM, SPH and vision-based methods [Text]* / L. Bohdal, L. Kukielka, S. Świllo, A.M. Radchenko, A. Kulakowska // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2078, Iss. 1. – Article Id: 020060. DOI: 10.1063/1.5092063.

29. *Modelling of guillotine process of grain oriented silicon steel using FEM [Text]* / L. Bohdal, L. Kukielka, A. M. Radchenko, R. Patyk, M. Kulakowski, J. Chodór // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2078, Iss. 1. – Article Id: 020080. DOI: 10.1063/1.509208.

30. *Modeling and Experimental Research of Shear-Slitting of AA6111-T4 Aluminum Alloy Sheet [Text]* / L. Bohdal, L. Kukielka, S. Legutko, R. Patyk, A. M. Radchenko // *Materials*. – 2020. – Vol. 13, Iss. 14. – Article Id: 3175. DOI: 10.3390/ma13143175.

References

1. Radchenko, A., Radchenko, N., Tsoy, A., Portnoi, B., Kantor, S. Increasing the efficiency of gas turbine inlet air cooling in actual climatic conditions of Kazakhstan and Ukraine. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2285, iss. 1, article id: 030071. DOI: 10.1063/5.0026787.

2. Radchenko, A., Trushliakov, E., Kosowski, K., Mikielewicz, D., Radchenko M. Innovative turbine intake air cooling systems and their rational designing. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 23, article Id: 6201. DOI: 10.3390/en13236201.

3. Radchenko, M., Mikielewicz, D., Andreev, A., Vanyeyev, S., Savenkov O. Efficient ship engine cyclic air cooling by turboexpander chiller for tropical climatic conditions. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2020*, LNNS, 2021, vol. 188, pp. 498-507. DOI: 10.1007/978-3-030-66717-7_42.

4. Radchenko, A., Scurtu, I.-C., Radchenko, M., Forduy, S., Zubarev, A. Monitoring the efficiency of cooling air at the inlet of gas engine in integrated energy system. *Thermal Science*, 2020, pp. 344. DOI: 10.2298/TSCI200711344R.

5. Radchenko, A., Mikielewicz, D., Forduy, S., Radchenko, M., Zubarev, A. Monitoring the Fuel Efficiency of Gas Engine in Integrated Energy System. I *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering (ICTM 2019)*. AISC, 2020, vol. 1113, pp. 361-370. DOI: 10.1007/978-3-030-37618-5_31.

6. Radchenko, A. M., Portnoi, B. S., Kantor, S. A., Priadko, O. I. Kalinichenko, I. V. Pidvyshchennia efektyvnosti okhodozhennia povitria na vkhodi HTD kholodylnymy mashynamy shliakhom akumulatsii kholodu [Increasing the efficiency of the air cooling at the GTE inlet by chillers with accumulation of cold]. *Aviacionno-kosmichna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2020, no. 4(164), pp. 22-27, DOI: 10.32620/aktt.2020.4.03.

7. Trushliakov, E., Radchenko, A., Forduy, S., Zubarev, A., Hrych, A. Increasing the Operation Efficiency of Air Conditioning System for Integrated Power

Plant on the Base of Its Monitoring. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering (ICTM 2019)*. AISC, 2020, vol. 1113, pp. 351-360. DOI: 10.1007/978-3-030-37618-5_30.

8. Radchenko, M., Radchenko, R., Tkachenko, V., Kantor, S., Smolyanoy, E. Increasing the Operation Efficiency of Railway Air Conditioning System on the Base of Its Simulation Along the Route Line. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering (ICTM 2019)*. AISC, 2020, vol. 1113, pp. 461-467. DOI: 10.1007/978-3-030-37618-5_39.

9. Kornienko, V., Radchenko, M., Radchenko, R., Konovalov, D., Andreev, A., Pyrysunko, M. Improving the efficiency of heat recovery circuits of cogeneration plants with combustion of water-fuel emulsions. *Thermal Science*, 2021, vol. 25(1B), pp. 791-800. DOI: 10.2298/TSCI200116154K.

10. Kornienko, V., Radchenko, R., Konovalov, D., Andreev, A., Pyrysunko, M.: Characteristics of the Rotary Cup Atomizer Used as Afterburning Installation in Exhaust Gas Boiler Flue. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III (DSMIE 2020)*. LNME, 2020, pp. 302-311. DOI: 10.1007/978-3-030-50491-5_29.

11. Konovalov, D., Kobalava, H., Radchenko, M., Sviridov, V., Scurtu, I.C. Optimal Sizing of the Evaporation Chamber in the Low-Flow Aerothermopressor for a Combustion Engine. *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020*. LNME, 2021, pp. 654-663. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5_63.

12. Trushliakov, E., Radchenko, M., Bohdal, T., Radchenko, R., Kantor, S. An innovative air conditioning system for changeable heat loads. *Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. InterPartner-2019*. LNME, 2020, pp. 616-625. DOI: 10.1007/978-3-030-40724-7_63.

13. Trushliakov, E., Radchenko, A., Radchenko, M., Kantor, S., Zielikov, O. The Efficiency of Refrigeration Capacity Regulation in the Ambient Air Conditioning Systems. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. LNME, 2020, pp. 343-353. DOI: 10.1007/978-3-030-50491-5_33.

14. Radchenko, A., Trushliakov, E., Tkachenko, V., Portnoi, B., Priadko, O. Improvement of the Refrigeration Capacity Utilizing for the Ambient Air Conditioning System. *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020*. LNME, 2020, pp. 714-723. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5_69.

15. Prokhorova, O. M. Zh.-L. Lagranzh kak odin iz osnovopolozhnikov teorii ekstremumov funktsiy mnogikh peremennykh [J.-L. Lagrange as one of the founders of the several variables functions extrema theory]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi – Radioelectronic and computer systems*, 2020, no. 1(93), pp. 103-111. DOI: 10.32620/reks.2020.1.10.

16. Kononenko, I. V., Lutsenko, S. Yu. Informatsionnaya sistema vybora i formirovaniya podkhoda k upravleniyu proektom [The information system for a project management approach selection and formation]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi – Radioelectronic and*

computer systems, 2020, no. 2(94), pp. 109-118, DOI: 10.32620/reks.2020.2.10.

17. Jonsson, M., Yan, J. Humidified gas turbines – a re-view of proposed and implemented cycles. *Energy*, 2005, no. 30, pp. 1013-1078, DOI: 10.1016/j.energy.2004.08.005.

18. Sexton, W. R., Sexton, M. R. The Effects of Wet Compression on Gas Turbine Engine Operating Performance. *Proceedings of GT2003 ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air 2009*, Atlanta, Georgia, USA, 2009. DOI: 10.1115/GT2003-38045.

19. Fowle, A. *An experimental investigation of an aerothermopressor having a gas flow capacity of 25 pounds per second*. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, USA, 1972.

20. Shapiro, A. H. Wadleigh, K. R. *The Aerothermopressor – a Device for Improving the Performance of a Gas-Turbine Power Plant*. Proceedings of the Trans. ASME, Cambridge, USA, 1956, pp. 617-653.

21. Konovalov, D., Kobalava, H., Radchenko, M., Scurtu, I. C., Radchenko, R. Determination of hydraulic resistance of the aerothermopressor for gas turbine cyclic air cooling. *Proceedings of the 9th International Conference on Thermal Equipments, Renewable Energy and Rural Development 2020, E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 180, article id: 01012. 14 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202018001012.

22. Konovalov, D., Kobalava, H., Maksymov, V., Radchenko, R., Avdeev, M. Experimental research of the excessive water injection effect on resistances in the flow part of a low-flow aerothermopressor. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. LNME, 2020, pp. 292-301. DOI: 10.1007/978-3-030-50491-5_28.

23. Oh, H. W. *Advanced Fluid Dynamics*. Rijeka, Croatia, 2012. 282 p.

24. Radchenko, N., Trushliakov, E., Radchenko, A., Tsoy, A., Shchesiuk, O. Methods to determine a design

cooling capacity of ambient air conditioning systems in climatic conditions of Ukraine and Kazakhstan. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2285, iss. 1, article id: 030074. DOI: 10.1063/5.0026790.

25. Radchenko, N., Radchenko, A., Tsoy, A., Mikieliewicz, D., Kantor, S., Tkachenko, V. Improving the efficiency of railway conditioners in actual climatic conditions of operation. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2285, iss. 1, article id: 030072, DOI: 10.1063/5.0026789.

26. Radchenko, N. I. On reducing the size of liquid separators for injector circulation plate freezers. *International Journal of Refrigeration*, 1985, vol. 8, no. 5, pp. 267-269.

27. Trushliakov, E., Radchenko, M., Radchenko, A., Kantor, S., Zongming, Y. Statistical Approach to Improve the Efficiency of Air Conditioning System Performance in Changeable Climatic Conditions. *5th International Conference on Systems and Informatics*, 2019, pp. 256-260. DOI: 10.1109/ICSIAI.2018.8599434.

28. Bohdal, L., Kukiela, L., Świłło, S., Radchenko, A. M., Kułakowska, A. Modelling and experimental analysis of shear-slitting process of light metal alloys using FEM, SPH and vision-based methods. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2078, iss. 1, article id: 020060. DOI: 10.1063/1.5092063.

29. Bohdal, L., Kukiela, L., Radchenko, A. M., Patyk, R., Kułakowski, M., Chodór, J. Modelling of guillotining process of grain oriented silicon steel using FEM. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2078, iss. 1, article id: 020080. DOI: 10.1063/1.509208.

30. Bohdal, L., Kukiela, L., Legutko, S., Patyk, R., Radchenko, A. M. Modeling and Experimental Research of Shear-Slitting of AA6111-T4 Aluminum Alloy Sheet. *Materials*, 2020, vol. 13, iss. 14, article id: 3175. DOI: 10.3390/ma13143175.

Надійшла до редакції 4.01.2021, розглянута на редколегії 16.02.2021

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА РАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕРМОПРЕССОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Д. В. Коновалов, Р. М. Радченко, Г. А. Кобалава, С. Г. Фордуй, В. П. Халдобин

Наиболее распространенным направлением увеличения мощности и сокращения потребления топлива современными энергетическими установками является контактное охлаждение газового или воздушного потока впрыском воды. Перспективным развитием этого направления является применение термопрессорных технологий, а именно использование теплоты, сжатого компрессорами энергетической установки, воздуха для ускорения потока к скорости близкой звуковой и практически мгновенного (при минимальных протяженности и влияниях аэродинамического сопротивления) испарение впрыснутой воды (эффект термогазодинамической компрессии). При разработке таких технологий важным является определение рациональных параметров организации теплофизических и гидродинамических процессов с соответствующей разработкой конструкции проточной части и специального программного продукта. Для этого необходимо использовать методы и средства для определения оптимальных рабочих параметров теплоутилизационных систем энергетических установок. В работе представлена блок-схема и алгоритм рациональной методики проектирования термопрессора, которые при применении в разработке программного продукта, позволяют обеспечить точное определение эффективности применения термопрессора в составе энергетической установки (на основе газотурбинного двигателя) для охлаждения циклового воздуха с учетом особенностей рабочих режимов в проточной части, а также при различных климатических условиях эксплуатации. Программный комплекс также позволяет рассчитать характеристики оборудования, систем и схемно-конструктивных решений при применении в составе энергетической установки: электрогенератора; теплоиспользующих холодильных машин

(эжекторные холодильные машины, абсорбционные холодильные машины) турбогенератора или парогенератора в составе тригенерационной установки или в составе турбокомпаундной установки (энергетические установки морских судов) утилизационного котла одного или двух давлений. Моделирование работы термопресорной системы охлаждения позволяет выявить эффективность применения такой системы в составе энергетической установки и сравнить ее с традиционными способами охлаждения и увлажнения циклового воздуха.

Ключевые слова: программный комплекс; термопресор; контактное охлаждение; компрессор; дисперсность; проточная часть; энергетическая установка.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE COMPLEX OF RATIONAL DESIGN OF COOLING SYSTEMS ON THE BASIS OF THERMOPRESSOR TECHNOLOGIES

D. Kononov, R. Radchenko, H. Kobalava, S. Forduy, V. Khaldobin

The most common way to increase power and reduce fuel consumption by modern power plants is contact cooling of a gas or air flow by water injection. A promising development of this direction is to use aerothermopressor technologies. The use of heat air, which is compressed by the power plant compressors, accelerates the flow to a speed close to the sound one and almost instantaneous evaporation of injected water (the effect of thermo-gas-dynamic compression). It is important to determine the rational parameters of the organization of thermophysical and hydrodynamic processes when developing such technologies. In this case, one should be taken into account the appropriate development of the flow path design and a special software product. It is necessary to use methods and means to determine the optimal operating parameters of the power plant heat recovery systems. This paper presents a block diagram and an algorithm of a rational methodology for designing an aerothermopressor, which makes it possible to accurately determine the efficiency of using an aerothermopressor as part of a power plant (based on a gas turbine engine) for cooling cycle air, considering the peculiarities of operating modes in the flow path, as well as under various climatic operating conditions. The algorithm of a rational methodology for designing aerothermopressor technologies allows calculating the characteristics of equipment, systems, and circuit design solutions when used as part of a power plant: an electric generator; heat-using refrigerating machines (ejector refrigerating machines, absorption refrigerating machines); turbine generator or steam generator as part of a trigeneration unit or as part of a turbo-compound unit (power plants of marine vessels); recovery boiler of one or two pressures. Modeling the aerothermopressor-cooling system operation makes it possible to reveal the effectiveness of using such a system as part of a power plant and compare it with traditional methods of cooling and humidifying cycle air.

Keywords: software complex; thermopressor; contact cooling; compressor; dispersion; flow part; power plant.

Конювалов Дмитро Вікторович – д-р техн. наук, зав. кафедри теплотехніки, Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна.

Радченко Роман Миколайович – канд. техн. наук, доц., Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Кобалава Галина Олександрівна – викладач каф. теплотехніки, Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна.

Фордуй Сергій Георгійович – канд. техн. наук, технічний керівник напряму енергоресурсів та енергозбереження PepsiCo, Inc., CTS ESSA, Київ, Україна.

Халдобін Віктор Павлович – асп. каф. кондиціювання та рефрижерації, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Dmytro Kononov – Doctor of Technical Sciences, Head Department of the Thermal Engineering department, The Kherson Branch of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, e-mail: dimitriyko79@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7127-0487, Scopus Author ID: 57209246625, <https://scholar.google.ru/citations?user=l5Ot7GQAAAAJ&hl=uk>.

Roman Radchenko – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8099-7327.

Halina Kobalava – Teacher of the Heat Engineering Department, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson Branch, Kherson, Ukraine, e-mail: g.lavamay@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0634-5814, Researcher ID: Q-7206-2017, Scopus Author ID: 57209244180, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=8BZ2xvwAAAAJ&hl=uk>.

Serhiy Forduy – Candidate of Technical Science, Sr. Engineering manager PepsiCo, Inc., Central Technical Team-Europe and Sub Saharan Africa (CTS ESSA), Kyiv, Ukraine, e-mail: serhiy.forduy@pepsico.com.

Viktor Khaldobin – Ph.D. student of Department of Air Conditioning and Refrigeration of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: mr.khaldobin@inbox.lv.