

УДК 004.94:621.527

DOI: 10.32620/reks.2021.3.04

Д. В. КОНОВАЛОВ<sup>1</sup>, Р. М. РАДЧЕНКО<sup>2</sup>, С. Г. ФОРДУЙ<sup>3</sup>, Ф. В. ЦАРАН<sup>2</sup>,  
В. П. ХАЛДОБІН<sup>1</sup>, А. В. ГРИЧ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна.

<sup>2</sup> Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна.

<sup>3</sup> PepsiCo, Inc., CTS ESSA, Київ, Україна

## МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЖЕКТОРА В ЗМІННИХ РЕЖИМАХ

Одним з актуальних напрямків розвитку сучасних енергозберігаючих і енергоефективних технологій для суднової та стаціонарної (в т.ч. муніципальної) енергетики, є застосування ежекторних холодильних машин, які можуть використовуватися для систем кондиціонування повітря разом із абсорбційною холодильною машиною (каскадний цикл) або із паро-компресорною холодильною машиною у складі когенераційних або тригенераційних установок. Такі схемні рішення можуть бути використовуватися разом із забезпеченням раціональної організації робочих процесів в основних елементах холодильної машини, зокрема в струминному апараті – ежекторі, відповідне проектування якого, в свою чергу, дозволить додатково підвищити тепловий коефіцієнт. Вдосконалення конструкції ежектора - це доволі складний та тривалий процес і не завжди дає позитивні результати. Це пов'язано, насамперед, з тим, що потрібно велика кількість випробування на натурних моделях. Отож, комп'ютерне моделювання роботи ежектора при різних перемінних вхідних параметрах з врахуванням геометричних характеристик проточної частини та змінних режимних характеристик під час експлуатації є більш привабливим з точки зору пошуку варіантів раціональної (оптимальної) конструкції. В роботі показано результати розробки програмного комплексу для моделювання гідродинамічних процесів в проточній частині ежектора з врахуванням перемінних робочих режимів ежекторної холодильної машини. При цьому використано існуючу методичку розрахунку напірно-циркуляційних характеристик струминних апаратів. Розроблений програмний комплекс "RefJet" у режимі проектування забезпечує визначення максимальних досяжних коефіцієнтів ежекції струминних ежекторів. У режимі моделювання - забезпечує визначення коефіцієнтів ежекції вже спроектованого (певних розмірів) ежектора при змінних значеннях тиску на вході та виході з нього, тобто в конкретних умовах експлуатації з урахуванням його роботи на граничних та часткових режимах. Роботу програмного комплексу було апробовано при розробці та аналізі схемних рішень ежекторних холодильних машин у складі контурів утилізації теплоти тригенераційних установок на базі двигунів внутрішнього згорання та газотурбінних двигунів.

**Ключові слова:** програмний комплекс; комп'ютерне моделювання; ежектор; робочий процес; холодильна машина; енергетична установка.

### Вступ

На сьогоднішній день сучасні тепловикористовуючі холодильні машини здатні виробляти холод, використовуючи при цьому різноманітні джерела теплової енергії (скидна теплота енергетичних установок, вторинна теплота технологічних установок та інш.) [1, 2]. Вироблений холод використовується для систем комфортного або технологічного кондиціонування повітря [3, 4], а також в системах охолодження теплових двигунів енергоустановок [5], що є одним з перспективних напрямків застосування таких машин у складі установок комбінованого виробництва енергії [6, 7]. Таке рішення істотно знижує витрати на холодопостачання, звідси і підвищений інтерес до хо-

лодильних машин, які використовують низькопотенційну теплоту [8, 9]. Одними з найбільш перспективних є ежекторні холодильні машини (ЕХМ) на низькокиплячих робочих тілах (НРТ) – холодоагентах [10, 11].

Однак, вони мають відносно низьку теплову ефективність, у зв'язку з чим, вельми актуальним є вдосконалення конструкції ежектора [12, 13], для чого необхідно реалізувати моделювання його роботи за різних кліматичних та гідрометеорологічних умов із врахуванням цілого ряду геометричних та режимних характеристик.

Останнім часом, вельми перспективним є використання спеціалізованих програмних комплексів для моделювання робочих теплофізичних та гідродинамічних процесів в елементах холодильних машин

(теплообмінні апарати, компресори, струминні апарати, насоси та інш.). Таке програмне забезпечення дає можливість для визначення раціональних або оптимальних геометричних і режимних характеристик холодильних машин шляхом моделювання при різних умовах експлуатації, що, у свою чергу, сприяє активному розвитку енергоефективних та енергозберігаючих технологій в галузях теплоенергетики та енергетичного машинобудування.

## 1. Аналіз проблеми і постановка мети та задач дослідження

У зв'язку із активним розвитком енергозберігаючих і енергоефективних технологій для суднової та стаціонарної (в т.ч. муніципальної) енергетики, ЕХМ можуть використовуватися для систем кондиціювання повітря разом із абсорбційною холодильною машиною (каскадний цикл) або із парокompресорною холодильною машиною у складі когенераційних або тригенераційних установок [14, 15]. Такі схемні рішення можуть бути використовуватися разом із забезпеченням раціональної організації робочих процесів в основних елементах (ежектор, конденсатор, генератор пари, випарник), що дозволяє додатково підвищити тепловий коефіцієнт  $\zeta$  [16]. Перспективним напрямком застосування струминних (ежекторних) технологій є створення контурів утилізації теплоти енергетичних установок на базі тепловикористовуючих холодильних машин [4, 17].

Тепловикористовуючі ЕХМ, на відміну від класичних і найбільш розповсюджених парокompресорних холодильних машин, виробляють холод споживаючи при цьому в основному низькопотенційну теплову енергію, а також невелику кількість електричної енергії на привод циркуляційного насосу.

Ежектор є одним з основних елементів ежекторної холодильної машини. Основні елементи апарату: робоче сопло, приймальня камера, камера змішання, дифузор. Ежектор – це струминний апарат, в якому здійснюється процес ежекції, що полягає в передачі кінетичної енергії одного потоку іншому потоку шляхом безпосереднього контакту (змішування) [18, 19]. Як правило, в ежекторах відбувається спочатку перетворення потенційної енергії та теплоти в кінетичну енергію. У процесі руху через проточну частину відбувається вирівнювання швидкостей змішуваних потоків, а потім зворотне перетворення кінетичної енергії змішаного потоку в потенційну енергію або теплоту.

Розвиток сучасних технологій для підвищення ефективності ЕХМ здійснюється в наступних напрямках: вдосконалення конструкції проточної частини ежектора; розробка раціональних схемних рішень із застосуванням ежекторів ЕХМ [20, 21].

Зараз активно ведуться роботи по вдосконаленню конструкції ежектора. Ежектори ЕХМ працюють, як правило, зі ступенем стиснення  $\varepsilon = 1,2 \dots 2,5$  [22, 23]. При ступенях  $\varepsilon > 3$  доцільно використовувати ежектори з конічною камерою змішування. При цьому можливе підвищення коефіцієнта ежекції  $U$  до 25 % [24, 25].

Ежектори ЕХМ працюють в області надкритичних ступенів розширення робочої пари. Для того, щоб використовувати весь перепад тиску – від тиску робочої пари на вході в сопло до тиску ежектованої пари, що саме необхідно для отримання максимальної швидкості робочої пари, в ежекторах застосовують сопло Лавалля.

В деяких випадках можуть застосовуватися багатосоплові ежектори [26, 27], що дозволяє зменшити довжину апарату. Вони можуть бути виконані з різними формами вихідного сопла: чотириструминною, зіркоподібною, кільцевою та ін.

Для збільшення коефіцієнта ежекції  $U$  доцільно підвищувати температуру робочої пари  $t_p$  [28, 29]. Однак, при цьому зростає теплота перегріву пари на виході з ежектора  $\Delta h_k$  і тепловий коефіцієнт  $\zeta$  може не підвищитися, тому необхідно також прагнути до зменшення  $\Delta h_k$ . Цього можна досягнути введенням у схему ЕХМ пароперегрівача та регенеративного теплообмінника (РТО) [30, 31]. У РТО за рахунок теплоти стиснутої в ежекторі пари відбувається підігрів рідкого холодоагенту на вході в генератор пари ЕХМ, що дозволяє скоротити витрату низькопотенційної теплоти на генератор. Ще більшої енергетичної ефективності можна досягнути використанням подвійної регенерації [32, 33]. Регенеративний теплообмінник, який встановлюється на всмоктуванні ежектора, забезпечує переохолодження конденсату перед регулюючим клапаном і відповідне підвищення холодопродуктивності ЕХМ. Зростання температури ежектованої пари знижує коефіцієнт ежекції  $U$ , однак підвищує температуру пари на виході з ежектора, створюючи умови для більш ефективної регенерації. Тому в цілому енергетична ефективність ЕХМ зростає. При цьому, в залежності від типу холодоагенту та параметрів циклу, чим нижче ефективність ЕХМ, тим більш помітний вплив регенерації [34, 35].

Слід зазначити, що робота із вдосконалення конструкції ежектора - це доволі складний та тривалий процес і не завжди дає позитивні результати. Це пов'язано, насамперед, з тим, що потрібно велика кількість випробування на натурних моделях. Застосування спеціалізованого програмного забезпечення розширює можливості моделювання робочого процесу та визначення раціональних геометричних та режимних характеристик [36, 37]. Отож, комп'ютерне моделювання роботи ежектора при різних пере-

мінних вхідних параметрах з врахуванням геометричних характеристик проточної частини та змінних режимних характеристик під час експлуатації є більш привабливим з точки зору пошуку варіантів раціональної (оптимальної) конструкції. Зважаючи на це, була сформульована основна мета дослідження.

**Мета дослідження** – розробка моделі гідродинамічних процесів в проточній частині ежектора та програмного комплексу для її реалізації з урахуванням впливу перемінних гідрометеорологічних та кліматичних умов експлуатації.

## 2. Результати дослідження

### 2.1. Моделювання роботи ежектора

Моделювання роботи ежектора (рис. 1) у складі ЕХМ основано на методиці розрахунку напірно-циркуляційних характеристик струминних апаратів [38]. Ефективність ежектора визначалася за коефіцієнтом ежекції як основною характеристикою:

$$u = G_n / G_p, \quad (1)$$

де  $G_n$ ,  $G_p$  – витрата неробочого (ежектованого) і робочого (активного) потоків.

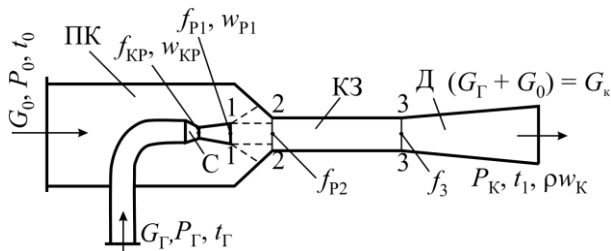


Рис. 1. Схема ежектора, вхідні та вихідні параметри: ПК – приймальна камера; КЗ – камера змішування; Д – дифузор

Конструкція ежектора, його геометричні характеристики і якість поверхні робочої частини повинні забезпечувати найефективніше використання енергії робочого струменя для стиснення ежектованої пари.

При розробці необхідно здійснити вибір найбільш раціонального шаблону для проектування програмного продукту, з наступною його модифікацією під прийняті вимоги [39, 40]. Розроблений програмний комплекс "RefJet" у режимі "**Проектування**" забезпечує визначення максимальних досяжних коефіцієнтів ежекції струминних ежекторів при заданих значеннях тиску гострої (робочої) пари на вході в сопло ежектора  $P_p$ , ежектованої (неробочої) пари  $P_n$  (пара холодоагенту після випарника ЕХМ) і пари на виході з ежектора  $P_c$  (вхід до конденсатора та генератора пароподібного холодоагенту ЕХМ). За коефіці-

єнтом ежекції й тиском визначаються характерні розміри ежектора для заданої витрати робочого тіла  $G_n$ ,  $G_p$ ,  $G_c$ .

Проектування ежектора починається з вибору форми камери змішування, яку рекомендується виконувати циліндричною або конічно-циліндричною – залежно від умов роботи струминного апарату.

Потребують розробки методи визначення оптимальної форми камери змішування. На підставі експериментальних досліджень струминних апаратів на водяній парі та повітрі встановлено, що для ежекторів циліндрична камера змішування дає більшу степінь підвищення тиску в порівнянні з камерами іншого профілю.

Степінь підвищення тиску:

$$e = P_c / P_n. \quad (2)$$

Степінь розширення робочого потоку:

$$E = P_p / P_n. \quad (3)$$

Розрахунок напірно-циркуляційних характеристик ежектора зводиться до визначення його максимального досяжного коефіцієнта ежекції  $U$  (рис. 2).

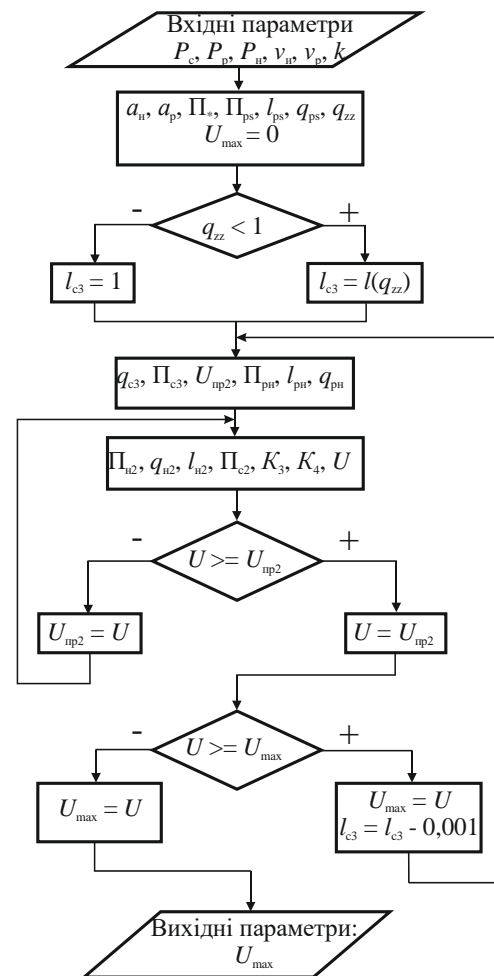


Рис. 2. Блок-схема розрахунку напірно-циркуляційних характеристик ежектора на заданих режимах

Подібний розрахунок зручно робити за допомогою спеціалізованого програмного комплексу. Досяжний коефіцієнт ежекції визначається за формулою:

$$u = \frac{1}{\sqrt{\Theta}} \frac{K_1 \frac{a_{p*}}{a_{c*}} \lambda_{pH} - K_3 \lambda_{c3}}{K_4 \lambda_{c3} - K_2 \frac{a_{H*}}{a_{c*}} \lambda_{H2}}, \quad (4)$$

$a_{p*}$ ,  $a_{H*}$ ,  $a_{c*}$  – критичні швидкості робочого, неробочого, стислого потоків, м/с:

$$a_{p*} = \sqrt{2 \frac{k_p}{k_p + 1} P_p v_p}, \quad (5)$$

$$a_{H*} = \sqrt{2 \frac{k_H}{k_H + 1} P_H v_H}, \quad (6)$$

$$a_{c*} = \sqrt{2 \frac{k_c}{k_c + 1} P_c v_c}, \quad (7)$$

де  $k_p$ ,  $k_H$ ,  $k_c$  — показники адиабати робочого, неробочого і стислого потоків;  $v$  – питомий об'єм.

Досяжний коефіцієнт ежекції, при  $k_p = k_H$ :

$$u = \frac{1}{\sqrt{\Theta}} \frac{K_1 \lambda_{pH} - K_3 \lambda_{c3}}{K_4 \lambda_{c3} - K_2 \lambda_{H2}}, \quad (8)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт швидкості робочого потоку;  $K_2$  – коефіцієнт швидкості неробочого потоку. На основі експериментальних досліджень рекомендується приймати  $K_1 = 0,834$  і  $K_2 = 0,812$  [21].

$$K_3 = 1 + \varphi_3 \frac{a_{p*} P_c}{a_{c*} P_p} \frac{(\Pi_{c3} - \frac{P_H}{P_c})}{k_p \Pi_{p*} \lambda_{c3} q_{pH}}, \quad (9)$$

$$K_4 = 1 + \varphi_3 \frac{a_{H*} P_c}{a_{c*} P_H} \frac{(\Pi_{c3} - \Pi_{c2})}{k_H \Pi_{H*} \lambda_{c3} q_{pH2}}. \quad (10)$$

При  $k_p = k_H$  ( $\Pi_{p*} = \Pi_{p*} = \Pi_{H*}$ ):

$$K_3 = 1 + \varphi_3 \frac{P_c}{P_p} \frac{(\Pi_{c3} - \frac{P_H}{P_c})}{k \Pi_{p*} \lambda_{c3} q_{pH}}, \quad (11)$$

$$K_4 = 1 + \varphi_3 \frac{P_c}{P_H} \frac{(\Pi_{c3} - \Pi_{c2})}{k \Pi_{p*} \lambda_{c3} q_{pH2}}. \quad (12)$$

де  $\varphi = 0,9$  — коефіцієнт швидкості дифузора;  $\lambda_{pH}$ ,  $\lambda_{H2}$ ,  $\lambda_{c3}$  – приведені ізентропні швидкості робочого та неробочого потоку на вході в камеру змішання і стислого потоку на вході в дифузор;  $q_{pH}$ ,  $q_{H2}$ ,  $q_{c3}$  – приведені масові швидкості робочого та неробочого потоку на вході в камеру змішання і стислого потоку на вході в дифузор;  $\Pi_{H2}$ ,  $\Pi_{c3}$  – відносний тиск неробочого потоку на вході в камеру змішання і стислого потоку на вході в дифузор.

$$\Pi_{pH} = P_H / P_p. \quad (13)$$

Відносний тиск змішаного потоку на вході в камеру змішання:

$$\Pi_{c2} = \Pi_{H2} \cdot P_H / P_p. \quad (14)$$

Відносний тиск в критичних перетинах робочого ( $\Pi_{p*}$ ) і неробочого потоку ( $\Pi_{H*}$ ):

$$\Pi_{*} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (15)$$

Приведена масова швидкість неробочого потоку на вході в камеру змішання:

$$q_{H2} = \frac{u}{(1+u) \frac{a_{c*} k_H \Pi_{H*} P_H}{a_{H*} k_c \Pi_{c*} P_c} \frac{1}{q_{c3}} - \frac{a_{p*} k_H \Pi_{H*} P_H}{a_{H*} k_p \Pi_{p*} P_p} \frac{1}{q_{pH}}}. \quad (16)$$

При  $k_p = k_H$ :

$$q_{H2} = \frac{u \sqrt{\Theta}}{\frac{P_H}{P_c} (1+u \sqrt{\Theta}) - \frac{P_H}{P_p} \frac{1}{q_{pH}}}. \quad (17)$$

Коефіцієнт ежекції при другому граничному режимі:

$$(u_{пр})_2 = \frac{\frac{a_{c*} k_H \Pi_{H*} P_H}{a_{H*} k_c \Pi_{c*} P_c} \frac{1}{q_{c3}} - \frac{a_{p*} k_H \Pi_{H*} P_H}{a_{H*} k_p \Pi_{p*} P_p} \frac{1}{q_{ps}}}{1 - \frac{a_{c*} k_H \Pi_{H*} P_H}{a_{H*} k_c \Pi_{p*} P_c} \frac{1}{q_{c3}}}. \quad (18)$$

При  $k_p = k_H$ :

$$(u_{пр})_2 \sqrt{\Theta} = \frac{\frac{P_H}{P_c} \frac{1}{q_{c3}} - \frac{P_H}{P_c} \frac{1}{q_{ps}}}{1 - \frac{P_H}{P_c} \frac{1}{q_{c3}}}. \quad (19)$$

Значення приведеної масової швидкості в перетині ss при другому граничному режимі знаходиться по відносному тиску робочого потоку в перетині ss:

$$\Pi_{ps} = \Pi_{H*} \cdot P_H / P_p. \quad (20)$$

Ознака неможливості роботи ежектора:

$$q_{c3} \geq \frac{P_p}{P_c} q_{ps}, \quad (21)$$

Дійсний коефіцієнт ежекції не може перевищувати  $(U_{пр})_2$ . При циліндричній камері змішання значення  $\lambda_{c3}$ , якими слід задаватися, повинні знаходитися в області  $\lambda_{c3} < 1$ . При розрахунку досяжного коефіцієнта ежекції  $U$  поступають наступним чином. Для кожного вибраного значення  $\lambda_{c3} < 1,0$  визначають по формулі (19) величину  $(U_{пр})_2$ ; приймають  $U = (U_{пр})_2$  і визначають по формулі (16) значення  $q_{H2}$ ; визначають по формулі (8) значення  $U$ . Якщо отримане по формулі (19) значення  $U > (U_{пр})_2$ , то приймають  $U = (U_{пр})_2$ .

У тому випадку, коли отримане по формулі (19)  $U < (U_{пр})_2$ , то задаються новим значенням  $U < (U_{пр})_2$ , визначають по формулі (16) значення  $q_{H2}$ ; визначають по формулі (8) значення  $U$ . Розрахунок вважається закінченим при збігу попереднього значення  $U$ , з отриманим.

Ентальпія змішаного потоку на виході з ежектора  $i_c$  визначається по формулі:

$$i_c = \frac{i_p + u i_H}{1 + u} \quad (22)$$

Розрахунок коефіцієнта ежекції для ежектора, при  $P_c / P_H > 2,5$ , аналогічний. Проте для таких апаратів оптимальною формою камери змішання є конічна [21, 23], тому додатково вводяться коефіцієнти  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\varphi$ . Відповідно формули (11), (12), (16), (8) при  $k_p = k_H$  приймають вигляд:

$$K_3 = 1 + \varphi_3 \frac{P_c}{P_p} \times \frac{P_{c3} - \frac{P_H}{P_c} (\beta - 0,5(\beta - 1) \Pi_{H2} (1 + (\frac{P_c}{P_H})^{1-\alpha} (\frac{P_{c3}}{\Pi_{H2}})^{1-\alpha}))}{k \Pi_* \lambda_{c3} q_{pH} \beta}} \quad (23)$$

$$K_4 = 1 + \varphi_3 \frac{P_c}{P_H} \times \frac{P_{c3} - \Pi_{c2} (\beta - 0,5(\beta - 1) (1 + (\frac{P_c}{P_H})^{1-\alpha} (\frac{P_{c3}}{\Pi_{H2}})^{1-\alpha}))}{k \Pi_* \lambda_{c3} q_{pH} 2 \beta}} \quad (24)$$

$$q_{H2} = \frac{u \sqrt{\Theta}}{\frac{P_H}{P_c} \beta (1 + u \sqrt{\Theta}) - \frac{P_H}{P_p} \frac{1}{q_{c3}}} \quad (25)$$

$$(u_{пр})_2 \sqrt{\Theta} = \frac{\mu \frac{P_H}{P_c} \frac{1}{q_{c3}} - \frac{P_H}{P_c} \frac{1}{q_{ps}}}{1 - \mu \frac{P_H}{P_c} \frac{1}{q_{c3}}} \quad (26)$$

де згідно рекомендацій [28, 29] –  $\beta = 0,5$ ,  $\alpha = 2...3$ ,  $\varphi = 1,35...1,50$ .

## 2.2. Розробка програмного комплексу

На основі приведеної вище методики було розроблено програмний комплекс "RefEject". Програма дозволяє розраховувати напірні характеристики ежектора на розрахунковому та змінних режимах, залежність максимального досяжного коефіцієнта ежекції від тиску змішаного потоку на виході ежектора з різною геометрією камери змішування.

Алгоритм розрахунку на заданих режимах включає наступні операції:

1) введення початкових даних – властивостей робочого тіла (холодоагенту), швидкісних коефіцієнтів, емпіричної залежності коефіцієнта подачі і питомої ефективної роботи холодильної машини від ступеня стиснення ежектора;

- 2) змінювати значення  $\lambda_{c3}$  і вид розрахунку U;
- 3) визначення  $U_{max}$ ;
- 4) фіксація газодинамічних функцій потоків в основних перетинах ежектора для  $U_{max}$ .

Підсистема "Режим" (рис. 3) програмного комплексу призначена для розрахунку напірних характеристик ежектора на розрахунковому режимі. Зліва вводяться вхідні дані: параметри активної, неробочої пари та пари на виході з ежектора, а також геометричні характеристики камери змішування. При натисканні "ОК" у правій частині виводяться максимальний коефіцієнт ежекції та напірні характеристики, необхідні для подальшого проектування ежектора.

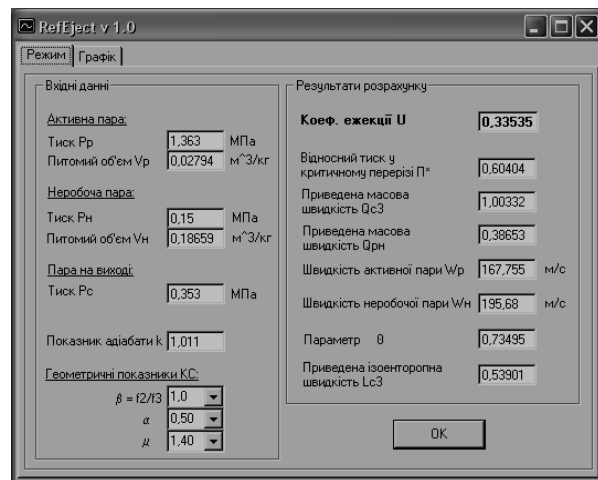


Рис. 3. Підсистема "Режим".

Підсистема "Графік" (рис. 4) призначена для отримання ряду значень та побудовання діаграм  $U = f(P_c)$  при вхідних даних на вкладці "Режим". Як приклад графічної інтерпретації результатів розрахунку, подано графік залежності коефіцієнтів ежекції U пароструминного ежектора від тиску пари на виході  $P_c$  при різному тиску робочої  $P_p$ .

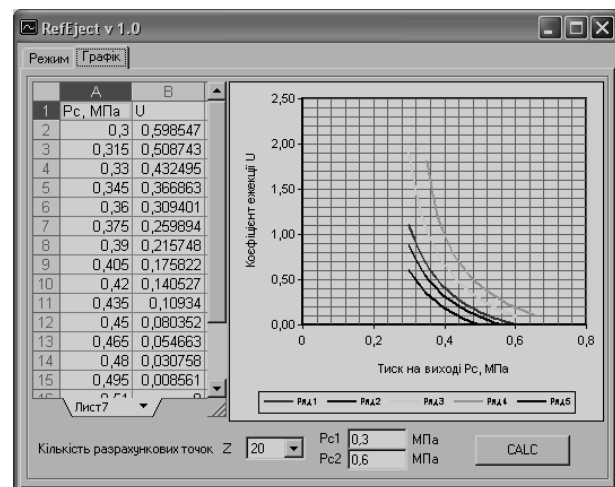


Рис. 4. Підсистема "Графік".

У режимі "Моделювання" програмний комплекс "RefJet" забезпечує визначення коефіцієнтів ежекції  $U$  вже спроектованого (певних розмірів) ежектора при змінних значеннях тиску на вході та виході з нього, тобто в конкретних умовах експлуатації з урахуванням його роботи на граничних, на яких має місце зрив роботи ежектора, та часткових режимах. Зміна коефіцієнту ежекції  $U$  в залежності від тиску пари на виході ежектора  $P_c$  при різному тиску робочої та ежектованої пари з урахуванням роботи ежектора на граничних режимах за результатами використання програмного комплексу у режимі моделювання наведена на рис. 5.

При моделюванні застосовується декілька підсистем (рис. 6), зокрема: CoolPack (побудова та розрахунок простих, комбінованих, та складних циклів холодильних машин, розрахунок термодинамічних та теплофізичних характеристик холодоагентів та робочих тіл для енергетичних установок, процесів обробки волого повітря систем кондиціонування); mundomanz (визначення параметрів зовнішнього повітря); CEAS, Diesel-RK (розрахунок розрахунку теплового потенціалу відпрацьованих газів, як джерела теплоти для генератора характеристик).

Розроблений комп'ютерний комплекс дозволяє проектувати й моделювати роботу ежектора ЕХМ для різних умов експлуатації, зокрема на часткових режимах роботи ежектора при зміні температури конденсації (змінні кліматичні умови) та температури кипіння в генераторі, яка залежить від температурного рівня утилізованої теплоти.

Програмний комплекс застосовано при розробці та аналізі схемних рішень ЕХМ у складі контурів

утилізації теплоти тригенераційних установок на базі двигунів внутрішнього згоряння та газотурбінних двигунів [8, 9, 13].

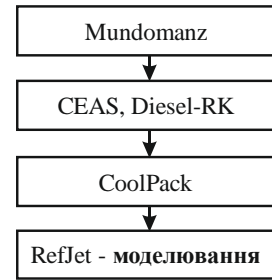


Рис. 6. Структура програмного комплексу

## Висновки

Переважна більшість програм розрахунку ежекторів обмежується номінальними режимами, що не дозволяє моделювати їх роботу в реальних змінних умовах експлуатації (при змінних температурах в генераторі ЕХМ, конденсації та кипіння у випарнику). Особливістю розробленого програмного комплексу для моделювання гідродинамічних процесів у проточній частині ежектора є врахування змінних режимів, і передусім найбільш небезпечних граничних режимів, на яких має місце зрив роботи ежектора, та часткових режимах, що у свою чергу дозволяє аналізувати та прогнозувати особливості роботи холодильної машини при змінних поточних кліматичних умовах.

Враховано вплив різних умов експлуатації: виникнення часткових режимів роботи ежектора при

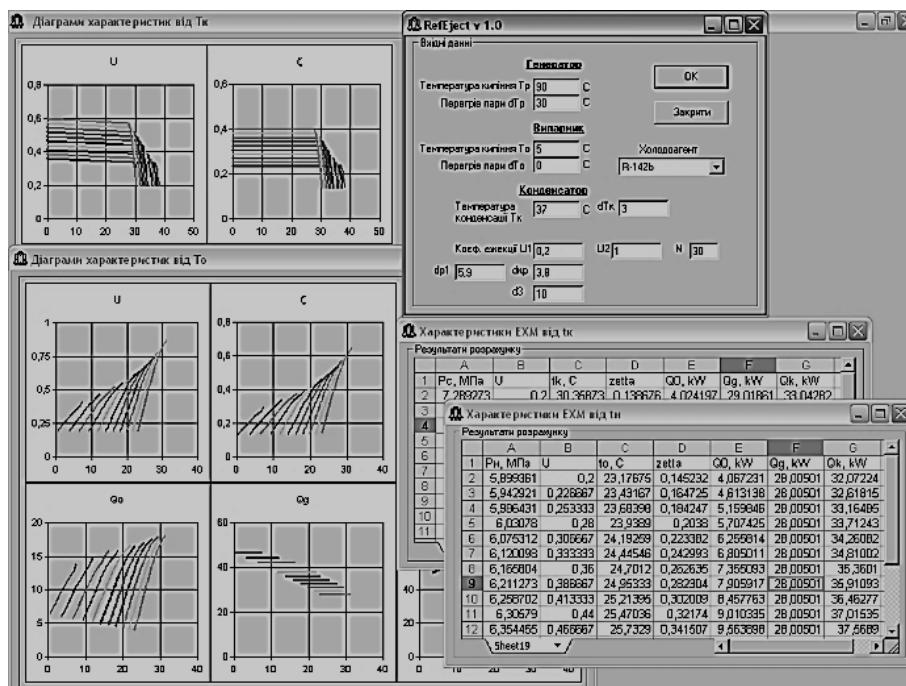


Рис. 5. Режим "Моделювання"

змінних температурах кипіння холодоагенту в генераторі, що залежать від температурного рівня утилізованої теплоти енергетичної установки та температури конденсації, яка залежить від навколишнього середовища.

При моделюванні застосовується декілька підсистем для побудови та розрахунку циклів холодильної машини, розрахунку термодинамічних та теплофізичних характеристик холодоагентів, визначення параметрів зовнішнього повітря, розрахунку теплового потенціалу джерела теплоти.

Перспективним напрямом подальших досліджень є моделювання робочих процесів в проточній частині ежекторів із використанням чисельних методів, наприклад, із застосуванням такого потужного програмного комплексу, як ANSYS Fluent, для визначення характеру течії в приймальній та робочій камерах з метою конструювання ефективної системи регулювання продуктивності ежектора та інш.

## Література

1. *Improvement of Characteristics of Water-Fuel Rotary Cup Atomizer in a Boiler* [Text] / V. Kornienko, R. Radchenko, D. Mikielewicz, M. Pyrysunko, A. Andreev // In: Tonkonogyi V. et al. (eds.) *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. LNME.* – 2021. – P. 664-674. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5\_64.
2. *Monitoring the Fuel Efficiency of Gas Engine in Integrated Energy System* [Text] / A. Radchenko, D. Mikielewicz, S. Forduy, M. Radchenko, A. Zubarev // In: Nechyporuk M., et al. (eds.) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. AISC.* – 2020. – Vol. 1113. – P. 361-370. DOI: 10.1007/978-3-030-37618-5\_31.
3. *Ship Engine Intake Air Cooling by Ejector Chiller Using Recirculation Gas Heat* [Text] / R. Radchenko, M. Pyrysunko, A. Radchenko, A. Andreev, V. Kornienko // In: Tonkonogyi V. et al. (eds.) *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. LNME.* – 2021. – P. 734-743. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5\_71.
4. *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 // In: Nechyporuk M., et al. (eds.) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. AISC.* – 2020. – vol. 1113. – P. 351-360. DOI: 10.1007/978-3-030-37618-5\_30.
5. *Innovative turbine intake air cooling systems and their rational designing* [Text] / A. Radchenko, E. Trushliakov, K. Kosowski, D. Mikielewicz, M. Radchenko // *Energies.* – 2020. – Vol. 13, no. 23. – Article Id: 6201. DOI: 10.3390/en13236201.
6. Билека, Б. Д. *Топливная экономичность когенерационно-теплонасосных технологий в котельных средней мощности* [Текст] / Б. Д. Билека, Л. К. Гаркуша // *Промышленная теплотехника.* – 2018. – Т. 40, № 1. – С. 51-55. DOI: 10.31472/ihe.1.2018.07.
7. Hafner, A. *Refrigeration units in marine vessels* [Text] / A. Hafner, C. H. Gabriellii, K. Widell // *Nordic Council of Ministers.* – 2018. – P. 8.
8. *Enhancement of the Operation Efficiency of the Transport Air Conditioning System* [Text] / M. Radchenko, D. Mikielewicz, V. Tkachenko, M. Klugmann, A. Andreev // In: Ivanov V., et al. (eds.) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. LNME.* – 2020. – P. 332-342.
9. *Semi-Empirical Correlations of Pollution Processes on the Condensation Surfaces of Exhaust Gas Boilers with Water-Fuel Emulsion Combustion* [Text] / M. Radchenko, R. Radchenko, V. Kornienko, M. Pyrysunko // In: Ivanov V., et al. (eds.) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. LNME.* – 2020. – P. 853-862. DOI: 10.1007/978-3-030-22365-6\_85.
10. *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 // In: Nechyporuk M., et al. (eds.) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. AISC.* – 2020. – vol. 1113. – P. 461-467. DOI: 10.1007/978-3-030-37618-5\_39.
11. *The Efficiency of Refrigeration Capacity Regulation in the Ambient Air Conditioning Systems* [Text] / E. Trushliakov, A. Radchenko, M. Radchenko, S. Kantor, O. Zielikov // In: Ivanov V., et al. (eds.) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. LNME.* – 2020. – P. 343-353. DOI: 10.1007/978-3-030-50491-5\_33.
12. 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.
13. *Determination of hydraulic resistance of the aerothermopressor for gas turbine cyclic air cooling* [Text] / D. Kononov, 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 180(3011):01012.* – 2020. – 14 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202018001012.
14. *Characteristics of the Rotary Cup Atomizer Used as Afterburning Installation in Exhaust Gas Boiler Flue* [Text] / V. Kornienko, R. Radchenko, D. Kononov, A. Andreev, M. Pyrysunko // In: Ivanov V., et al. (eds.) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. LNME.* – 2020. – P. 302-311. DOI: 10.1007/978-3-030-50491-5\_29.
15. *Rational loads of turbine inlet air absorption-ejector cooling systems* [Text] / M. Radchenko, A. Radchenko, R. Radchenko, S. Kantor, D. Kononov, V. Kornienko // *Proc IMechE Part A: J Power and Energy.* – 2021. – (OnlineFirst). – 13 p. DOI: 10.1177/09576509211045455.
16. *Experimental research of the excessive water injection effect on resistances in the flow part of a low-flow aerothermopressor* [Text] / D. Kononov, H. Kobalava, V. Maksymov, R. Radchenko, M. Avdeev // In: Ivanov V., et al. (eds.) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. LNME.* – 2000. – P. 292-301. DOI: 10.1007/978-3-030-50491-5\_28.
17. *Evaluation of steam jet ejectors.* *Chemical Engineering and Processing* [Text] / H. Dessouky,



H. Ettouney, I. Alatiqi, G. Nuwaibit // *Process Intensification*. – 2002. – Vol. 41, No. 6. – P. 551–561.

18. Elbel, S. Review of recent developments in advanced ejector technology [Text] / S. Elbel, N. Lawrence // *International Journal of Refrigeration*. – 2016. – Vol. 62. – P. 1-18.

19. Elbel, S. Historical and present developments of ejector refrigeration systems with emphasis on transcritical carbon dioxide air conditioning [Text] / S. Elbel // *International Journal of Refrigeration*. – 2011. – Vol. 34, No. 7. – P. 1545-1561.

20. Lawrence, N. Experimental investigation of a two-phase ejector cycle suitable for use with low-pressure refrigerants R134a and R1234yf [Text] / N. Lawrence, S. Elbel // *International Journal of Refrigeration*. – 2014. – Vol. 38. – P. 310-322.

21. Elbel, S. Ejector Refrigeration: An Overview of Historical and Present Developments with an Emphasis on Air-Conditioning Applications [Text] / S. Elbel, P. Hrnjak // *In International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. – 2008. – Paper 884.

22. Experimental investigation and theoretical analysis of an ejector refrigeration system [Text] / D. A. Pounds, J. M. Dong, P. Cheng, H. B Ma // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2013. – No. 67. – P. 200-209.

23. 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.

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

25. Chen, J. Y. Investigation of ejector in refrigeration systems: optimum performance evaluation and ejector area ratios perspectives [Text] / J. Y. Chen, H. Havtun, B. Palm // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – No. 64. – P. 182–191.

26. Investigations of prototype ejection refrigeration system driven by low grade heat [Text] / D. Butrymowicz, J. Gagan, K. Śmierciew, M. Łukaszuk, A. Dudar, A. Pawluczuk, A. Łapiński, A. Kuryłowicz // *HTRSE-2018, E3S Web of Conferences 70. 03002*. – 2018. – 7 p.

27. Tan, Y. Thermodynamic performance of an auto-cascade ejector refrigeration cycle with mixed refrigerant R32, R236fa [Text] / Y. Tan, L. Wang, K. Liang // *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – No. 84. – P. 268–275.

28. A one dimensional model for the determination of an ejector entrainment ratio [Text] / J. G. Valle, J. M. S. Jabardo, F. C. Ruiz, J. Alonso // *International Journal of Refrigeration*. – 2012. – Vol. 35, No. 4. – P. 772-784.

29. Yari, M. Thermodynamic analysis and optimization of novel ejector-expansion TRCC (transcritical CO<sub>2</sub>) cascade refrigeration cycles (Novel transcritical CO<sub>2</sub> cycle) [Text] / M. Yari, S. M. S. Mahmoudi // *Energy*. – 2011. – No. 36. – P. 6839-6850.

30. Investigation of an experimental ejector refrigeration machine operating with refrigerant R245fa at design and off-design working conditions [Text] / K. O. Shestopalov, B. J. Huang, V. O. Petrenko, O. S. Volovyk // *International Journal of Refrigeration*. – 2015. – No. 55. – P. 212–223.

31. Stefan, E. Review of recent developments in advanced ejector technology [Text] / E. Stefan, L. Neal // *International Journal of Refrigeration*. – 2016. – 18 p.

32. Mohammed, K. Effects of design conditions and irreversibilities on the dimensions of ejectors in refrigeration systems [Text] / K. Mohammed, G. Nicolas, S. Mikhail // *Applied Energy*. – 2016. – No. 179. – P. 1020–1031.

33. Yapici, R. Performance characteristics of the ejector refrigeration system based on the constant area ejector flow model [Text] / R. Yapici, H. K. Ersoy // *Energy Conversion and Management*. – 2005. – No. 46. – P. 3117–3135.

34. Nehdi, E. Performance analysis of the vapour compression cycle using ejector as an expander [Text] / E. Nehdi, L. Kairouani, M. Bouzaina // *Int. J. Energy Res.* – 2007. – No. 31. – P. 364–375.

35. Eames, I. W. Results of an experimental study of an advanced jet-pump refrigerator operating with R245fa [Text] / I. W. Eames, A. E. Abhwaifa, V. O. Petrenko // *Applied Thermal Engineering*. – 2007. – No. 27. – P. 2833–2840.

36. Kracik, J. Development of an analytical method for predicting flow in a supersonic air ejector [Text] / J. Kracik, V. Dvorak // *EPJ Web of Conferences*. – 2016. – 114. DOI: 10.1051/epjconf/201611402059.

37. Cui, Y. Simulation of flow field in steam ejector and analysis of shock wave characteristics [Text] / Y. Cui // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – No. 198. DOI: 10.1051/mateconf/201819803001.

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

39. Бичок, М. О. Оцінка використання шаблонів проектування програмного забезпечення [Текст] / М. О. Бичок, О. К. Погудіна // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2021. – № 1(97). – С. 103-111. DOI: 10.32620/reks.2021.1.09.

40. Розробка програмного комплексу раціонального проектування систем охолодження на основі термодинамічних технологій [Текст] / Д.В. Коновалов, Р.М. Радченко, Г.О. Кобалава, С.Г. Фордуй, В.П. Халдобін // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2021. – № 1(97). – С. 60-69. DOI: 10.32620/reks.2021.1.05.

## References

1. Kornienko, V., Radchenko, R., Mikielwicz, D., Pyrsunko, M., Andreev, A. Improvement of Characteristics of Water-Fuel Rotary Cup Atomizer in a Boiler. *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. LNME*, 2021, pp. 664-674. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5\_64.

2. Radchenko, A., Mikielwicz, D., Forduy, S., Radchenko, M., Zubarev, A. Monitoring the Fuel Efficiency of Gas Engine in Integrated Energy System. *Inte-*



grated Computer Technologies in Mechanical Engineering (ICTM 2019). AISC, 2020, vol. 1113, pp. 361-370. DOI: 10.1007/978-3-030-37618-5\_31.

3. Radchenko, R., Pyrysunko, M., Radchenko, A., Andreev, A., Kornienko, V. Ship Engine Intake Air Cooling by Ejector Chiller Using Recirculation Gas Heat. *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020*. LNME, 2021, pp. 734-743. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5\_71.

4. 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.

5. Radchenko, A., Trushliakov, E., Kosowski, K., Mikielwicz, 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.

6. Bileka, B. D., Garkusha, L. K. Toplivnaya ekonomichnost kogeneratsionno-teplonasosnykh tekhnologiy v kotelnykh sredney moshchnosti [The fuel economicity of cogeneration- heat pump technologies on the basis of gas turbine installations in medium capacity boiler-houses]. *Promyshlennaya teplotekhnika – Industrial heating technology*, 2018, vol. 40, no.1, pp. 51-55. DOI:10.31472/ihe.1.2018.07.

7. Hafner, A., Gabriellii, C. H., Widell, K.: Refrigeration units in marine vessels. *Nordic Council of Ministers*, 2018, pp. 8.

8. Radchenko, M., Mikielwicz, D., Tkachenko, V., Klugmann, M., Andreev, A. Enhancement of the Operation Efficiency of the Transport Air Conditioning System. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II*. LNME, 2019, pp. 332-342.

9. Radchenko, M., Radchenko, R., Kornienko, V., Pyrysunko, M. Semi-Empirical Correlations of Pollution Processes on the Condensation Surfaces of Exhaust Gas Boilers with Water-Fuel Emulsion Combustion. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II*. LNME, 2019, pp. 853-862. DOI: 10.1007/978-3-030-22365-6\_85.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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 180(3011):01012, 2020. 14 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202018001012.

14. 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.

15. Radchenko, M., Radchenko, A., Radchenko, R., Kantor, S., Konovalov, D., Kornienko, V. Rational loads of turbine inlet air absorption-ejector cooling systems. *Proc. IMechE Part A: J Power and Energy*, 2021, (OnlineFirst). 13 p. DOI: 10.1177/09576509211045455.

16. 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.

17. Dessouky, H., Ettouney, H., Alatiqi, I., Nuwaibit, G. Evaluation of steam jet ejectors. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2002, vol. 41, no. 6, pp. 551–561.

18. Elbel, S., Lawrence, N. Review of recent developments in advanced ejector technology. *International Journal of Refrigeration*, 2016, vol. 62, pp. 1-18.

19. Elbel, S. Historical and present developments of ejector refrigeration systems with emphasis on transcritical carbon dioxide air conditioning. *International Journal of Refrigeration*, 2011, vol. 34, no. 7, pp. 1545-1561.

20. Lawrence, N., Elbel, S. Experimental investigation of a two-phase ejector cycle suitable for use with low-pressure refrigerants R134a and R1234yf. *International Journal of Refrigeration*, 2014, vol. 38, pp. 310-322.

21. Elbel, S. Hrnjak, P. Ejector Refrigeration: An Overview of Historical and Present Developments with an Emphasis on Air-Conditioning Applications. *In International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, 2008, Paper 884.

22. Pounds, D. A., Dong, J. M., Cheng, P., Ma, H. B. Experimental investigation and theoretical analysis of an ejector refrigeration system. *International Journal of Thermal Sciences*, 2013, no. 67, pp. 200-209.

23. 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.

24. 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.

25. Chen, J. Y., Havtun, H., Palm, B. Investigation of ejector in refrigeration systems: optimum performance evaluation and ejector area ratios perspectives. *Applied Thermal Engineering*, 2014, no. 64, pp. 182–191.

26. Butrymowicz, D., Gagan, J., Śmierciew, K., Łukaszuk, M., Dudar, A., Pawluczuk, A., Łapiński, A., Kuryłowicz, A. Investigations of prototype ejection refrigeration system driven by low grade heat. *HTRSE-2018, E3S Web of Conferences* 70, 2018. 7 p.
27. Tan, Y., Wang, L., Liang, K. Thermodynamic performance of an auto-cascade ejector refrigeration cycle with mixed refrigerant R32, R236fa. *Applied Thermal Engineering*, 2015, no. 84, pp. 268–275.
28. Valle, J. G., Jabardo, J. M. S., Ruiz, F. C., Alonso, J. A one dimensional model for the determination of an ejector entrainment ratio. *International Journal of Refrigeration*, 2012, vol. 35, no. 4, pp. 772–784.
29. Yari, M., Mahmoudi, S. M. S. Thermodynamic analysis and optimization of novel ejector-expansion TRCC (transcritical CO<sub>2</sub>) cascade refrigeration cycles (Novel transcritical CO<sub>2</sub> cycle). *Energy*, 2011, no. 36, pp. 6839–6850.
30. Shestopalov, K. O., Huang, B. J., Petrenko, V. O., Volovyk, O. S. Investigation of an experimental ejector refrigeration machine operating with refrigerant R245fa at design and off-design working conditions. *International Journal of Refrigeration*, 2015, no. 55, pp. 212–223.
31. Stefan, E., Neal, L. Review of recent developments in advanced ejector technology. *International Journal of Refrigeration*, 2016. 18 p.
32. Mohammed, K., Nicolas, G., Mikhail, S. Effects of design conditions and irreversibilities on the dimensions of ejectors in refrigeration systems. *Applied Energy*, 2016, no. 179, pp. 1020–1031.
33. Yapici, R., Ersoy, H. K. Performance characteristics of the ejector refrigeration system based on the constant area ejector flow model. *Energy Conversion and Management*, 2005, no. 46, pp. 3117–3135.
34. Nehdi, E., Kairouani, L., Bouzaina, M. Performance analysis of the vapour compression cycle using ejector as an expander. *Int. J. Energy Res.* 2007, no. 31, pp. 364–375.
35. Eames, I. W., Ablwaifa, A. E., Petrenko, V. O. Results of an experimental study of an advanced jet-pump refrigerator operating with R245fa. *Applied Thermal Engineering*, 2007, no. 27, pp. 2833–2840.
36. Kracik, J., Dvorak, V. Development of an analytical method for predicting flow in a supersonic air ejector. *EPJ Web of Conferences*, 2016, 114. DOI: 10.1051/epjconf/201611402059.
37. Cui, Y. Simulation of flow field in steam ejector and analysis of shock wave characteristics. *MATEC Web of Conferences*, 2018, no. 198. DOI: 10.1051/mateconf/201819803001.
38. Oh, H. W. *Advanced Fluid Dynamics*. Rijeka, Croatia, 2012. 282 p.
39. Bychok, M., Pohudina, O. Otsinka vykorystannya shabloniv proektuvannya prohramnoho zabezpechennya [Evaluation of use of design templates in the software development]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi – Radioelectronic and computer system*, 2021, no. 1(97), pp. 103–111. DOI: 10.32620/reks.2021.1.09.
40. Konovalov, D., Radchenko, R., Kobalava, H., Forduy S., Khaldobin V. Rozrobka prohramnoho kompleksu ratsional'noho proektuvannya system okhlozdzhennya na osnovi termopresornykh tekhnolohiy [Development of software complex of rational design of cooling systems on the basis of thermopressor technologies]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi – Radioelectronic and computer system*, 2021, no. 1(97), pp. 103–111. DOI: 10.32620/reks.2021.1.05.

Надійшла до редакції 10.04.2021, розглянута на редколегії 23.09.2021

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЖЕКТОРА НА ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ

Д. В. Коновалов, Р. М. Радченко, С. Г. Фордуй, Ф. В. Царан, В. П. Халдобин, А. В. Грич

Одним из актуальных направлений развития современных энергосберегающих и энергоэффективных технологий для судовой и стационарной (в т.ч. муниципальной) энергетики, применение эжекторных холодильных машины, которые могут использоваться для систем кондиционирования воздуха вместе с абсорбционной холодильной машиной (каскадный цикл) или с пароконденсаторной холодильной машиной в составе когенерационных или тригенерационных установок. Такие схемные решения могут быть использоваться вместе с обеспечением рациональной организации рабочих процессов в основных элементах холодильной машины, в частности в струйном аппарате - эжекторе, соответствующее проектирование которого, в свою очередь, позволит дополнительно повысить тепловой коэффициент. Совершенствование конструкции эжектора - это довольно сложный и длительный процесс и не всегда дает положительные результаты. Это связано прежде всего с тем, что нужно большое количество испытания на натуральных моделях. И так, компьютерное моделирование работы эжектора при различных переменных входных параметрах с учетом геометрических характеристик проточной части и переменных режимных характеристик при эксплуатации является более привлекательным с точки зрения поиска вариантов рациональной (оптимальной) конструкции. В работе показаны результаты разработки программного комплекса для моделирования гидродинамических процессов в проточной части эжектора с учетом переменных рабочих режимов эжекторной холодильной машины. При этом использовано существующую методику расчета напорно-циркуляционных характеристик струйных аппаратов. Разработанный программный комплекс "RefJet" в режиме проектирования обеспечивает определение максимальных достижимых коэффициентов эжекции струйных эжекторов. В режиме моделирования - обеспечивает определение коэффициентов эжекции уже спроектированного (определенных размеров) эжектора при переменных значениях давления на входе и выходе из него, то есть в конкретных условиях эксплуа-

тации с учетом его работы на предельных и частичных режимах. Работа программного комплекса была апробирована при разработке и анализе схемных решений эжекторных холодильных машин в составе контуров утилизации теплоты тригенерационных установок на базе двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных двигателей.

**Ключевые слова:** программный комплекс; компьютерное моделирование; эжектор; рабочий процесс; холодильная машина; энергетическая установка.

## SIMULATION AND SOFTWARE FOR RESEARCH OF EJECTOR OPERATION IN VARIABLE MODES

*D. Konovalov, R. Radchenko, S. Forduy, F. Tsaran, V. Khaldobin, A. Hrych*

One of the current directions of development of modern energy-saving and energy-efficient technologies for ship and stationery (including municipal) energy is the use of ejector refrigeration machines, which can be used for air conditioning systems together with an absorption refrigeration machine (cascade cycle) or vapor compressor refrigeration machine as part of cogeneration or trigeneration units. Such circuit solutions can be used together with ensuring the rational organization of work processes in the main elements of the refrigeration machine, in particular in the jet device - ejector, the appropriate design of which, in turn, will further increase the thermal coefficient. Improving the design of the ejector is a rather complex and long process and does not always give positive results. It is primarily because many tests are required on full-scale models. Therefore, computer simulation of the ejector operation at different variable input parameters, considering the geometric characteristics of the flow part and variable mode characteristics during operation is more attractive in terms of finding options for rational (optimal) design. The paper presents the results of software development for modeling hydrodynamic processes in the flowing part of the ejector, considering the variable operating modes of the ejector refrigeration machine. The existing method for calculating the pressure and circulation characteristics of jet devices is used. The developed software complex "RefJet" in the design mode defines the maximum achievable coefficients of ejection of a jet ejector. In the simulation mode - provides determination of the ejection coefficients of the already designed (certain sizes) ejector at variable values of pressure at the inlet and outlet in specific operating conditions, considering its operation at the limit and partial modes. The work of the software package was tested in the development and analysis of circuit solutions of ejector refrigeration machines as part of the heat recovery circuits of three-generation units based on internal combustion engines and gas turbine engines.

**Keywords:** software package; computer simulation; ejector; workflow; refrigeration machine; power plant.

**Коновалов 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.

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

**Царан Фелікс Володимирович** – аспірант кафедри кондиціонування та рефрижерації, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

**Халдобін Віктор Павлович** – аспірант кафедри кондиціонування та рефрижерації, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

**Грич Артем Вікторович** – канд. техн. наук, доц., Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

**Dmytro Konovalov** – Doctor of Technical Sciences, Head Department, The Kherson Branch of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, e-mail: dimitriyko79@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7127-0487.

**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.

**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, ORCID: 0000-0003-0110-4090.

**Felix Tsaran** – Ph.D. student of Department of Air Conditioning and Refrigeration of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: felseras@gmail.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, ORCID: 0000-0002-0498-4401.

**Artem Hrych** – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: artem.grich@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2142-3665.