

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
до курсового і дипломного проектування

**«РОЗРАХУНОК ЕЖЕКТОРА»**

для студентів фахів 7.090500 «Теплоенергетика»  
і 7.000008 «Енергетичний менеджмент»

Затверджено  
редакційно-видавничою  
радою університету,  
протокол № 3 от 21.12.07.

Харків НТУ «ХПИ» 2008

Методичні вказівки до курсового і дипломного проектування «Розрахунок ежектора» для студентів фахів 7.090510 «Теплоенергетика» і 7.000008 «Енергетичний менеджмент» / Уклад. Р.Г. Акмен, А.П. Желтоноженко. – Харків: НТУ «ХП», 2008. – 21 с.

Укладачі: Р.Г. Акмен  
А.П. Желтоноженко

Рецензент Є. Н. Бесчаров

Кафедра теплотехніки та енергоефективних технологій

## ВСТУП

Струминні апарати (ежектори, компресори) знаходять широке застосування в різних галузях промисловості. Зокрема, вони використовуються в конденсаційних пристроях паротурбінних установок, в деяких типах випарних установок. Для інженера-теплоенергетика подібні установки розглядаються як в курсовому, так і в дипломному проектуванні. Детальна методика розрахунку таких апаратів викладена в [1,2], проте, дефіцит цієї літератури і потреби проєктантів приводять до необхідності коротшого викладу основ розрахунку і конструювання подібних апаратів.

Ці методичні вказівки містять основи і приклад розрахунку ежектора, як найбільш широко вживаного струминного апарата.

*Основні позначення:*

$G$  – масова витрата;

$K$  – розрахунковий коефіцієнт;

$P$  – тиск;

$R$  – газова постійна;

$T$  – абсолютна температура;

$a$  – місцева швидкість звука;

$i$  – ентальпія;

$f$  – площа поперечного перерізу;

$k$  – показник адіабати;

$q$  – приведена масова швидкість;

$u$  – коефіцієнт інжекції;

$v$  – питомий об'єм;

$P$  – відносний тиск;

$\beta$  – відносний питомий об'єм або відношення площин в конічній камері змішування;

$\varepsilon$  – відносна густина;

$\varphi$  – коефіцієнт швидкості;

$\lambda$  – приведена адіабатна швидкість;

$\rho$  – густина;

$\tau$  – відносна температура;

$\omega$  – швидкість.

Простий нижній індекс

Перерізи апарата:

\* – критичний переріз робочого сопла;

1 – вихідний переріз робочого сопла;

2 – вхідний переріз камери змішування;

3 – вихідний переріз камери змішування.

Потоки:

$p$  – робочий потік перед соплом струминного апарата;

$и$  – потік, що інжектується, перед приймальною камерою струминного апарата;

$c$  – стислий потік після дифузора струминного апарата;

0 – адіабатно загальмований потік.

Складний нижній індекс

$p^*$  – робочий потік в критичному перерізі сопла;

$p_1$  – робочий потік в вихідному перерізі сопла;

$p_2$  – робочий потік в вхідному перерізі камери змішування;

$i_2$  – інжектований потік в вхідному перерізі камери змішування.

$c_3$  – змішаний потік в вихідному перерізі камери змішування.

## 1. ГАЗОДИНАМІЧНІ ФУНКЦІЇ

При розрахунку струминних апаратів використовуються газодинамічні функції, що зв'язують приведену адіабатну швидкість потоку газу або пари з його термодинамічними параметрами [1].

Під приведеною адіабатною швидкістю розуміється відношення швидкості газу при його адіабатній течії до критичної швидкості:

$$\lambda = \frac{\omega_a}{a_*}. \quad (1.1)$$

Критична швидкість газу, що є швидкістю потоку, рівною місцевій швидкості звуку, визначається як

$$a_* = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} RT_0} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} P_0 v_0}. \quad (1.2)$$

Показник адіабати для ідеального газу

$$k = \frac{c_p}{c_v}.$$

Параметр  $\lambda$  може змінюватися в межах от  $\lambda=0$ , що відповідає нерухомому середовищу, до  $\lambda_{\max} = \sqrt{\frac{k+1}{k-1}}$ , що відповідає витіканню потоку в абсолютний вакуум.

Для двохатомних газів

$$k = 1,4, \quad \sqrt{\frac{2k}{k+1}} = 1,08, \quad \lambda_{\max} = 2,45,$$

для перегрітого водяного пара

$$k = 1,3, \quad \sqrt{\frac{2k}{k+1}} = 1,06, \quad \lambda_{\max} = 2,77,$$

для сухого насиченого водяного пара

$$k = 1,13, \quad \sqrt{\frac{2k}{k+1}} = 1,03, \quad \lambda_{\max} = 4,05.$$

Найчастіше використовуються наступні газодинамічні функції.

Функція  $\tau(\lambda)$  – відносна температура, тобто відношення абсолютної температури  $T$  газу, що рухається адіабатно в даному перерізі, до абсолютної температури адіабатного гальмування  $T_0$ :

$$\tau = \frac{T}{T_0} = 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2. \quad (1.3)$$

Функція  $\Pi(\lambda)$  – відносний тиск, тобто відношення, статичного тиску  $P$  газу, що рухається адіабатно в даному перерізі, к тиску адіабатного гальмування  $P_0$ :

$$\Pi = \frac{P}{P_0} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (1.4)$$

Функція  $\varepsilon(\lambda)$  – відносна густина, тобто відношення густини  $\rho$  газу, що рухається адіабатно в даному перерізі, к густині  $\rho_0$  загальмованого потоку:

$$\varepsilon = \frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (1.5)$$

Функція  $\beta(\lambda)$  – відносний питомий об'єм, тобто відношення питомого об'єму  $v$  потоку, що рухається ізоентропно в даному перерізі, до питомого об'єму  $v_0$  загальмованого потоку:

$$\beta = \frac{v}{v_0} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{-\frac{1}{k-1}}. \quad (1.6)$$

Під параметрами гальмування  $T_0, P_0, \rho_0, v_0$  розуміються абсолютна температура, тиск, густина та питомий об'єм газу при адіабатному зниженні його швидкості до нуля.

Із складніших газодинамічних функцій при розрахунку струминних апаратів вельми часто використовується функція  $q(\lambda)$ , що є приведеною масовою швидкістю: відношення масової швидкості  $\omega\rho$ , кг/(м<sup>2</sup> с), потоку, що адіабатно рухається в даному перерізі, до масової швидкості цього потоку  $a_*\rho_*$ , кг/(м<sup>2</sup> с), в критичному перерізі:

$$q = \frac{\omega\rho}{a_*\rho_*} = \frac{\omega}{a_*} \frac{\rho}{\rho_0} \frac{\rho_0}{\rho_*} = \frac{\lambda\varepsilon}{\varepsilon_*}. \quad (1.7)$$

З умови сплошності потоку виходить, що функція  $q$  дорівнює відношенню площ критичного перерізу потоку і даного перерізу:

$$q = \frac{f_*}{f}. \quad (1.8)$$

Для критичного перерізу  $q_* = \lambda_* = 1$ .

В різних модифікаціях функцію  $q$  можна записати так:

$$q = \frac{f_*}{f} = \frac{\lambda\varepsilon}{\varepsilon_*} = \lambda_{\max} \left(\frac{\Pi}{\Pi_*}\right)^{\frac{1}{k} \sqrt{1-\Pi}^{\frac{k-1}{k}}} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}} = \lambda_{\max} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_*} \sqrt{1 - k^{k-1}}. \quad (1.9)$$

У додатку наведені значення функцій  $\Pi(\lambda)$ ,  $q(\lambda)$  для трьох значень показника адіабати 1,3; 1,13; 1,4.

Як видно з рівняння (1.9), величина  $q$  перетворюється в нуль при  $\lambda = 0$  і  $\lambda = \lambda_{\max}$ , маючи максимальне значення  $q = 1$  при  $\lambda = 1$ .

При витіканні в абсолютний вакуум ( $\lambda = \lambda_{\max}$ ) приведена масова витрата  $q = 0$ , оскільки відносна питома густина  $\varepsilon$  перетворюється в нуль.

Показник адіабати суттєво впливає на значення функції  $q(\lambda)$  поблизу надзвукової області при  $\lambda > 1$ .

У деяких розрахунках, зокрема при розрахунку характеристик струминних компресорів і ежекторів без дифузорів, зручно використовувати відношення газодинамічних функцій

$$\omega = \frac{q}{\Pi} = \frac{\lambda}{\varepsilon_* \Pi^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{\lambda}{\varepsilon_* \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)}. \quad (1.10)$$

## 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ЕЖЕКТОРА

До газоструминних ежекторів, згідно з прийнятою класифікацією [2], відносяться струминні апарати з мірою стискування інжектowanego середовища  $P_c / P_u > 2,5$ . При такій мірі стискування оптимальною є конічна форма камери змішування.

Для збільшення граничного коефіцієнта інжекції і збереження великої міри стискування в газоструминних ежекторах камера змішування виконується такою, що складається з двох частин: розвиненої конічної частини (конфузору), що звужується, і наступної циліндрової частини (горловина).

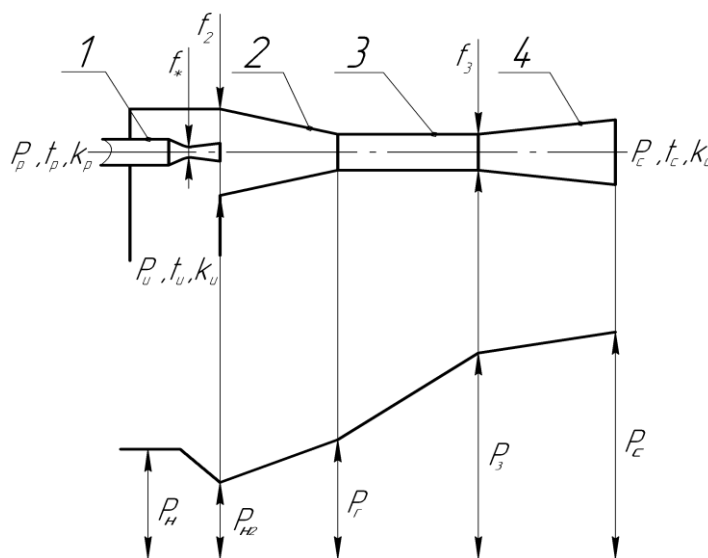


Рисунок 1 – Схема ежектора

На рис. 1 схематично зображено профіль проточної частини ежектора і вказані основні позначення, а також розподіл тиску в проточній частині апарата.

Вихідний переріз робочого сопла умовно поєднаний з вхідним перерізом камери змішування. Вважається, що на ділянці між площиною вихідного перерізу сопла і вхідним перерізом конфузора робочий та інжектований потоки течуть ізольовано і не змішуються, або що вихідний переріз сопла збігається з вхідним перерізом конфузора.

Для камери змішування, що складається з конічної і циліндричної частин, рівняння збереження імпульсу можна записати таким чином:

$$\Phi_2 (G_p \omega_{p2} + G_n \omega_{n2}) - (G_p + G_n) \omega_3 = P_3 f_3 + \int_{f_2}^{f_3} P df - P_{p2} f_{p2} - P_{n2} f_{n2}, \quad (2.1)$$

де  $\int_{f_2}^{f_3} P df$  – інтеграл імпульсу сил, що обумовлені реакцією стінок конфузору.

Введенням в перший член лівої частини рівняння (2.1) множника  $\Phi_2 < 1$  враховується втрата кількості руху в камері змішування із-за тертя. Оскільки вважається, що вихідний переріз робочого сопла поєднаний з вхідним перерізом камери змішування то  $f_{p2} = f_{p1}$ , і  $\omega_{p2} = \omega_{p1}$ . При розрахунковому режимі роботи апарата  $P_{p2} = P_{p1} = P_n$ . Нехтуємо початковими швидкостями  $\omega_p$  і  $\omega_n$  робочого та інжектowanego потоків у підвідних трубопроводах, через малість цих швидкостей у порівнянні з швидкостями цих потоків в камері змішування. Вводячи за допомогою коефіцієнтів швидкості поправку на неадіабатність процесів розширення і стискування, можна виразити швидкості потоків у характерних перерізах камери змішування струминного апарату наступними рівняннями.

Швидкість робочого потоку у вхідному перерізі камери змішування

$$\omega_{p2} = \Phi_1 a_{p*} \lambda_{p2} = \Phi_1 a_{p*} \lambda_{p1}. \quad (2.2)$$

При  $P_{p2} = P_n$ ,  $\Pi_{p2} = \frac{P_{p2}}{P_p} = \frac{P_n}{P_p} = \Pi_{p1}$ , звідкіля  $\lambda_{p2} = \lambda_{p1}$ .

Швидкість інжектowanego потоку у вхідному перерізі камери змішування

$$\omega_{n2} = \Phi_4 a_{n*} \lambda_{n2}. \quad (2.3)$$

Аналогічно, нехтуючи швидкістю  $\omega_c$  стиснутого потоку на виході з дифузора, можна записати вираз для швидкості змішаного потоку в вихідному перерізі камери змішування:

$$\omega_3 = \frac{a_{c*}}{\Phi_3} \lambda_{c3}. \quad (2.4)$$

У рівняннях (2.2) – (2.4)  $\Phi_1$ ,  $\Phi_3$ ,  $\Phi_4$  – коефіцієнти швидкості робочого сопла, дифузора, вхідної ділянки камери змішування.

Для конічної камери змішування

$$f_3 = \frac{f_2}{\beta} = \frac{f_{p2} + f_{и2}}{\beta} = \frac{f_{p1} + f_{и2}}{\beta}. \quad (2.5)$$

Критичний переріз любого потоку може бути знайдений як

$$f_* = \frac{G a_*}{k \Pi_* P_0}. \quad (2.6)$$

Згідно з рівнянням (1.9) площа любого перерізу потоку  $f$  може бути виражена через площу критичного перерізу  $f_*$  як

$$f = \frac{f_*}{q}. \quad (2.7)$$

На основі рівнянь (2.6) і (2.7) площа робочого потоку в перерізі 2–2

$$f_{p2} = \frac{G_p a_{p*}}{k_p \Pi_{p*} P_p q_{p2}} = \frac{G_p a_{p*}}{k_p \Pi_{p*} P_p q_{pи}}. \quad (2.8)$$

В рівнянні (2.8) прийнято  $q_{p2} = q_{pи}$ , оскільки при розрахунковому режимі  $P_{p2} = P_{pи}$  і, отже,  $\Pi_{p2} = \Pi_{pи}$ .

Прохідна площа інжектованого потоку в перерізі 2–2

$$f_{и2} = \frac{G_{и} a_{и*}}{k_{и} \Pi_{и*} P_{и} q_{и2}}. \quad (2.9)$$

Прохідна площа змішаного потоку в перерізі 3–3

$$f_3 = \frac{G_c a_{c*}}{\beta k_c \Pi_{c*} P_c q_{c3}}. \quad (2.10)$$

На основі рівняння (2.5) при конічній камері змішування

$$f_3 = \frac{G_p a_{p*}}{\beta k_p \Pi_{p*} P_p q_{pи}} + \frac{G_{и} a_{и*}}{\beta k_{и} \Pi_{и*} P_{и} q_{и2}} = \frac{G_c a_{c*}}{\beta k_c \Pi_{c*} P_c q_{c3}}. \quad (2.11)$$

$\Pi_{3г} = P_{г} / P_3 > 2,5$  – відношення тисків на початку і в кінці циліндричної частини камери змішування.

Підвищення тиску в камері змішування виразимо за допомогою залежностей:

$$\Pi_{3г} = \frac{P_{г}}{P_3} = \left( \frac{P_2}{P_3} \right)^{\alpha} = \left( \frac{P_{и}}{P_c} \right)^{\alpha} \left( \frac{\Pi_{и2}}{\Pi_{c3}} \right)^{\alpha}, \quad (2.12)$$

$$\alpha = \frac{\lg(P_3 / P_{г})}{\lg(P_3 / P_2)} = \frac{\lg P_3 - \lg P_{г}}{\lg P_3 - \lg P_2}. \quad (2.13)$$

Приймаючи лінійне зростання тиску в конфузори (див. рис.1) і маючи на увазі, що  $f_{г} = f_3$ , знаходимо:

$$\int_{f_2}^{f_3} P df = P_{и2} f_3 \Phi_1 + P_{г} f_3 \Phi_2 = P_{и2} f_3 \Phi_1 + P_3 \Pi_{3г} f_3 \Phi_2, \quad (2.14)$$

де

$$\Phi_1 = \frac{1}{3} (2\beta - \sqrt{\beta} - 1); \quad \Phi_2 = \frac{1}{3} (\beta + \sqrt{\beta} - 2) \quad (2.15)$$



Середнє значення

$$\Phi_{\text{cp}} = \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{2} = \frac{1}{2}(\beta - 1). \quad (2.16)$$

Якщо замість значень  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$  прийняти їх середнє значення, то відносне максимальне відхилення  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$  від середнього значення становитиме:

$$\frac{\Phi_1 - \Phi_2}{2 \Phi_{\text{cp}}} = \frac{1}{3} \frac{\sqrt{\beta - 1}}{\sqrt{\beta + 1}} \quad (2.17)$$

При значеннях  $\beta = 2 \div 3$ , що звичайно приймаються, відносна похибка у

визначенні  $\int_{f_2}^{f_3} P df$  у результаті заміни  $\Phi_1$  та  $\Phi_2$  їх середнім значенням, не перевершує  $5 \div 8 \%$ , що припустимо, якщо враховувати наближеність прийнятого лінійного закону зростання тиску в конфузори. Із врахуванням прийнятих припущень

$$\int_{f_2}^{f_3} P df = \Phi_{\text{cp}} f_3 (P_{\text{и2}} + P_3 \Pi_{3r}) = 0,5 f_3 (\beta - 1) (P_{\text{и2}} + P_3 \Pi_{3r}). \quad (2.18)$$

Підставляючи у рівняння (2.1) значення швидкостей  $\omega_{p2}$ ;  $\omega_{\text{и2}}$ ;  $\omega_3$  з (2.5) – (2.7); значення перерізів потоків  $f_{p2}$ ;  $f_{\text{и2}}$ ;  $f_3$  з (2.12) – (2.14); значення

статичних тисків  $P_{\text{и2}} = P_{\text{и}} \Pi_{\text{и2}}$ ;  $P_3 = P_{\text{с}} \Pi_{\text{с3}}$  і значення  $\int_{f_2}^{f_3} P df$  – з (2.18),

отримуємо після відповідних перетворень наступне рівняння для розрахунку коефіцієнта інжекції газоструминного ежектора:

$$u = \frac{K_1 \frac{a_{p^*}}{a_{c^*}} \lambda_{\text{ри}} - K_3 \lambda_{\text{с3}}}{K_4 \lambda_{\text{с3}} - K_2 \frac{a_{\text{и}^*}}{a_{c^*}} \lambda_{\text{и2}}}, \quad (2.19)$$

де

$$K_1 = \Phi_1 \Phi_2 \Phi_3, \quad (2.20)$$

$$K_2 = \Phi_2 \Phi_3 \Phi_4, \quad (2.21)$$

$$K_3 = 1 + \Phi_3 \frac{a_{p^*} P_{\text{с}}}{a_{c^*} P_{\text{п}}} \frac{\Pi_{\text{с3}} - \frac{P_{\text{и}}}{P_{\text{с}}} \left( \beta - 0,5(\beta - 1) \Pi_{\text{и2}} \left( 1 + \left( \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{и}}} \right)^{1-\alpha} \left( \frac{\Pi_{\text{с3}}}{\Pi_{\text{и2}}} \right)^{1-\alpha} \right) \right)}{k_{\text{п}} \beta \Pi_{\text{п}^*} q_{\text{ри}} \lambda_{\text{с3}}}, \quad (2.22)$$

$$K_4 = 1 + \varphi_3 \frac{a_{и*} P_c}{a_{c*} P_{и}} \frac{\Pi_{c3} - \Pi_{c2} \left( \beta - 0,5(\beta - 1) \left( 1 + \left( \frac{P_c}{P_{и}} \right)^{1-\alpha} \left( \frac{\Pi_{c3}}{\Pi_{и2}} \right)^{1-\alpha} \right) \right)}{k_{и} \beta \Pi_{и*} q_{и2} \lambda_{c3}}. \quad (2.23)$$

У частковому випадку при  $k_p = k_{и} = k$  і  $R_p = R_{и} = R$

$$u = \frac{K_1 \lambda_{pи} - K_3 \lambda_{c3}}{K_4 \lambda_{c3} - K_2 \lambda_{и2}} \frac{1}{\sqrt{\theta}}, \quad (2.24)$$

де

$$K_3 = 1 + \varphi_3 \frac{P_c}{P_p} \frac{\Pi_{c3} - \frac{P_{и}}{P_c} \left( \beta - 0,5(\beta - 1) \Pi_{и2} \left( 1 + \left( \frac{P_c}{P_{и}} \right)^{1-\alpha} \left( \frac{\Pi_{c3}}{\Pi_{и2}} \right)^{1-\alpha} \right) \right)}{k \beta \Pi_{и*} q_{pи} \lambda_{c3}}, \quad (2.25)$$

$$K_4 = 1 + \varphi_3 \frac{P_c}{P_{и}} \frac{\Pi_{c3} - \Pi_{c2} \left( \beta - 0,5(\beta - 1) \left( 1 + \left( \frac{P_c}{P_{и}} \right)^{1-\alpha} \left( \frac{\Pi_{c3}}{\Pi_{и2}} \right)^{1-\alpha} \right) \right)}{k \beta \Pi_{и*} q_{и2} \lambda_{c3}}. \quad (2.26)$$

Значення  $\lambda_{и2}$  і  $\lambda_{c3}$  у рівнянні зв'язані між собою геометричними розмірами газоструминного ежектора. Цей зв'язок визначається виразом (2.5), яке із врахуванням того, що

$$f_3 = \frac{G_p (1 + u) a_{c*}}{k_c \Pi_{c*} P_c q_{c3}}, \quad (2.27)$$

запишіться у вигляді

$$\frac{a_{p*}}{k_p \Pi_{p*} P_p q_{pи}} + \frac{u a_{и*}}{k_{и} \Pi_{и*} P_{и} q_{и2}} = \frac{\beta (1 + u) a_{c*}}{k_c \Pi_{c*} P_c q_{c3}}. \quad (2.28)$$

Звідкіля

$$q_{и2} = \frac{u}{\beta (1 + u) \frac{a_{c*}}{a_{и*}} \frac{k_{и}}{k_c} \frac{\Pi_{и*}}{\Pi_{c*}} \frac{P_{и}}{P_c} \frac{1}{q_{c3}} - \frac{a_{p*}}{a_{и*}} \frac{k_{и}}{k_p} \frac{\Pi_{и*}}{\Pi_{p*}} \frac{P_{и}}{P_p} \frac{1}{q_{pи}}}. \quad (2.29)$$

У окремому випадку, коли показники адіапати робочого та інжектваного потоків однакові, тобто  $k_p = k_{и} = k$  і  $R_p = R_{и} = R$

$$q_{и2} = \frac{u \sqrt{\theta}}{\beta (1 + u \sqrt{\theta}) \frac{P_{и}}{P_c} \frac{1}{q_{c3}} - \frac{P_{и}}{P_p} \frac{1}{q_{pи}}}. \quad (2.30)$$

При розрахунку досяжного коефіцієнта інжекції газоструминного ежектора з конічною камерою змішування, необхідно врахувати обмежуючу умову, яка полягає в тому, що в будь-якому з проміжних перерізів конічної частини

камери змішування, позначеному  $s-s$  (див. рис.1), швидкість інжектованого потоку не може перевищувати критичну швидкість, тобто  $\lambda_{и2} \leq 1$ .

При граничному режимі коефіцієнт інжекції знаходиться з рівняння:

$$u_{пр} = \frac{\mu \frac{a_{с*}}{a_{и*}} \frac{k_{и}}{k_{с}} \frac{\Pi_{и*}}{\Pi_{с*}} \frac{P_{и}}{P_{с}} \frac{1}{q_{с3}} - \frac{a_{р*}}{a_{и*}} \frac{k_{и}}{k_{р}} \frac{\Pi_{и*}}{\Pi_{р*}} \frac{P_{и}}{P_{р}} \frac{1}{q_{ри}}}{1 - \mu \frac{a_{с*}}{a_{и*}} \frac{k_{и}}{k_{с}} \frac{\Pi_{и*}}{\Pi_{с*}} \frac{P_{и}}{P_{с}} \frac{1}{q_{с3}}} . \quad (2.31)$$

При  $k_{р} = k_{и} = k$  і  $R_{р} = R_{и} = R$

$$u_{пр} = \frac{\mu \frac{P_{и}}{P_{с}} \frac{1}{q_{с3}} - \frac{P_{и}}{P_{р}} \frac{1}{q_{ри}}}{1 - \mu \frac{P_{и}}{P_{с}} \frac{1}{q_{с3}}} \frac{1}{\sqrt{\theta}} . \quad (2.32)$$

Дійсний коефіцієнт інжекції газоструминного ежектора  $u$  не може перевищувати  $u_{пр}$ , тобто  $u \leq u_{пр}$ . Значення  $\mu$ , що визначає величину  $u_{пр}$ , поки не може бути визначено теоретично. На основі результатів випробувань газоструминних ежекторів можна прийняти значення  $\mu = 1,35 \div 1,5$ .

Методика розрахунку досяжного коефіцієнта інжекції по приведених рівняннях наступна:

- 1) при розрахунку задають значення  $\beta$  і  $\alpha$ . Значення  $\beta$ , що приймаються звичайно на підставі випробувань, проведених заводами, що виготовляють пароструминні ежектори, знаходяться в діапазоні  $2 \div 3$ . Значення  $\alpha \approx 0,5$  – для ежектора з оптимальною формою проточної частини;
- 2) визначають критичні швидкості потоків по (1.2);
- 3) визначають  $\Pi_{ри}$  по (2.2) і знаходять відповідні значення  $\lambda_{ри}$  і  $q_{ри}$  по газодинамічним таблицям при відомому  $k$ ;
- 4) задається значення  $\lambda_{с3}=1$ ;
- 5) по газодинамічним таблицям при відомому  $\lambda_{с3}$  і  $k$  знаходять відповідні значення  $q_{с3}$  і  $\Pi_{с3}$ ;
- 6) визначається  $u_{пр}$  по (2.31) або по (2.32);
- 7) визначається  $q_{и2}$  по (2.29) або по (2.30) і знаходяться відповідні значення  $\lambda_{и2}$  і  $\Pi_{и2}$  по газодинамічним таблицям при відомому  $k$ ;
- 8) визначаються коефіцієнти  $K_1, K_2, K_3, K_4$  по (2.20) – (2.23) або по (2.20), (2.21), (2.25) і (2.26);
- 9) визначається значення  $u$  по (2.19) або по (2.24);
- 10) порівнюються отримані значення  $u$  і  $u_{пр}$ , при  $u > u_{пр}$  зменшується  $\lambda_{с3}$  с кроком 0,1 і розрахунок повторюється з пункту 5. до тих пір, поки не виконається нерівність  $u < u_{пр}$ ;

11) обчислюється відмінність коефіцієнтів  $\delta u$ , якщо вона менше заданої міри точності, розрахунок вважається закінченим, інакше крок зменшується в 10 разів і останній інтервал по  $\lambda_{c3}$  розраховується, починаючи з пункту 5.

### 3. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ПАРОВОГО ЕЖЕКТОРА

#### *Вихідні дані.*

Насичена робоча пара перед ежектором має тиск  $P_p = 6 \cdot 10^5$  Па, та інжектуює насичену пару –  $P_{и} = 5,4 \cdot 10^3$  Па. Після ежектора стисла насичена пара повинна мати тиск  $P_c = 3,1 \cdot 10^4$  Па, витрата стислої пари  $G_c = 2,3$  кг/с. Критичне відношення тисків для насиченої пари становить  $\Pi_* = 0,579$ , а показник адіабати –  $k = 1,13$ . Прийняти швидкісні коефіцієнти робочого сопла, дифузора, вхідної та вихідної ділянки камери змішування відповідно рівними  $\varphi_1 = 0,95$ ;  $\varphi_2 = 0,975$ ;  $\varphi_3 = 0,9$ ;  $\varphi_4 = 0,925$ . Прийняти відношення площин поперечних перерізів початку і кінця конічної камери змішування  $\beta = 2$ , а відношення площі поперечного перерізу з критичною швидкістю інжектованого потоку та площі кінця конічної частини камери змішування  $\mu = 1,5$ . Температура навколишнього середовища  $T_{o.c} = 300$  К. Ступінь точності розрахунку прийняти 0,5 %.

#### *Визначити:*

- досяжний коефіцієнт інжекції;
- розміри характерних перерізів ежектора;
- коефіцієнт корисної дії ежектора.

#### *Рішення.*

Визначаємо термодинамічні параметри потоків. Для робочого потоку  $v_p = 0,32 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $i_p = 2756$  кДж/кг,  $s_p = 6,76$  кДж/(кг К), для інжектованого –  $v_{и} = 26,4 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $i_{и} = 2564$  кДж/кг,  $s_{и} = 8,35$  кДж/(кг К), для змішаного –  $v_c = 5,11 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $s_c = 7,77$  кДж/(кг К).

Критичні швидкості робочого та інжектованого потоків визначаються по (1.2), відповідно  $a_{p*} = 451$  м/с,  $a_{и*} = 389$  м/с.

Позначимо  $\sqrt{\theta} = \frac{a_{и*}}{a_{p*}} = \frac{389}{451} = 0,862$ , тоді  $\frac{1}{\sqrt{\theta}} = \frac{1}{0,862} = 1,16$ .

Відносний тиск

$$\Pi_{p2} = \Pi_{пн} = \frac{P_{и}}{P_p} = \frac{5,4 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^5} = 0,009.$$

Згідно  $P_{и} / P_p$  по газодинамічним таблицям (таб. Д2) визначаємо приведену адіабатну швидкість  $\lambda_{пн} = 2,62$  та приведену масову швидкість  $q_{пн} = 0,066$ .

Розрахунок ведемо методом подекадних наближень.

Спочатку приймаємо  $\lambda_{c3} = 1$ , згідно з  $\lambda_{c3}$  по газодинамічним таблицям (табл. Д2) визначаємо приведену масову швидкість  $q_{c3} = 1$  і відносний тиск  $P_{c3} = 0,5787$ .

Граничний коефіцієнт інжекції визначається з (2.35), відповідно  $u_{np} = 0,161$ .

Приведена масова швидкість визначається з (2.30), відповідно  $q_{и2} = 0,602$ .

Згідно з  $q_{и2}$  по газодинамічним таблицям (табл. Д2) визначаємо приведену адіабатну швидкість  $\lambda_{и2} = 0,399$  і відносний тиск.  $P_{и2} = 0,918$

Відносний тиск

$$P_{c2} = \frac{P_{и}}{P_c} P_{и2} = \frac{5,4 \cdot 10^3}{3,1 \cdot 10^4} \cdot 0,911 = 0,16.$$

Коефіцієнти визначаються з (2.20), (2.21), (2.25) і (2.26). Відповідно  $K_1 = 0,834$ ,  $K_2 = 0,812$ ,  $K_3 = 1,275$ ,  $K_4 = 4,055$ .

Досяжний коефіцієнт інжекції визначається з (2.24),  $u = 0,301$ .

Коефіцієнти інжекції відрізняються на

$$\delta u = \frac{|u - u_{np}|}{0,5(u + u_{np})} \cdot 100\% = \frac{|0,161 - 0,301|}{0,5(0,161 + 0,301)} \cdot 100\% = 60,7\%.$$

Оскільки отримана відмінність коефіцієнтів інжекції більше заданої міри точності і значення  $u > u_{np}$ , що неможливе, приймаємо для цих умов як розрахунковий коефіцієнт інжекції  $u_p = 0,196$ .

Розрахунок повторюємо за тим же алгоритмом, знижуючи  $\lambda_{c3}$  з кроком 0,1, доки не виконається нерівність  $u < u_{np}$ . Після цього проходимо останній інтервал з кроком в десять разів меншим, доки не виконається задана точність розрахунку.

Дані розрахунку внесені в таблицю.

Таким чином, розрахункове значення коефіцієнта ежекції  $u_p = 0,296$ .

К характерним перерізам парового ежектору відноситься: критичний переріз робочого сопла, вхідний та вихідний переріз камери змішування.

Витрата робочої пари

$$G_p = \frac{G_c}{1 + u} = \frac{2,3}{1 + 0,296} = 1,775 \text{ кг/с.}$$

Площа критичного перерізу визначається з (2.6), відповідно  $f_* = 2,04 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ .

Діаметр критичного перерізу  $d_* = 0,051 \text{ м}$ .

Таблиця – Результати розрахунку парового ежектора

$\lambda_{c3}$	$q_{c3}$	$P_{c3}$	$u_{пр}$	$q_{и2}$	$\lambda_{и2}$	$P_{и2}$	$P_{c2}$	$K_3$	$K_4$	$u$	$u_{расч}$
1	1	0,578	0,161	0,602	0,399	0,918	0,160	1,275	4,055	0,301	0,161
0,9	0,989	0,644	0,166	0,605	0,402	0,917	0,160	1,354	4,881	0,290	0,166
0,8	0,956	0,707	0,182	0,616	0,411	0,914	0,159	1,451	5,840	0,285	0,182
0,7	0,899	0,768	0,212	0,632	0,424	0,909	0,158	1,572	6,970	0,286	0,212
0,6	0,821	0,825	0,266	0,653	0,441	0,902	0,157	1,728	8,354	0,292	0,266
0,5	0,721	0,875	<b>0,361</b>	0,676	0,460	0,893	0,156	1,938	10,16	<b>0,303</b>	0,361
0,59	0,811	0,830	0,273	0,655	0,443	0,901	0,157	1,746	8,512	0,293	0,273
0,58	0,803	0,835	0,281	0,657	0,444	0,900	0,157	1,765	8,674	0,294	0,281
0,57	0,793	0,840	0,289	0,659	0,446	0,899	0,157	1,784	8,841	0,295	0,289
0,56	0,783	0,845	<b>0,297</b>	0,662	0,448	0,893	0,157	1,804	9,012	<b>0,296</b>	0,297
0,569	0,785	0,844	0,290	0,660	0,447	0,899	0,157	1,786	8,857	0,295	0,290
....											
0,562	0,785	0,844	<b>0,296</b>	0,661	0,448	0,899	0,157	1,800	8,979	<b>0,296</b>	0,296

Площа, яку займає робочий потік в вхідному перерізі камери змішування, визначається по (2.8), відповідно  $f_p = 0,031 \text{ м}^2$ .

Площа, яку займає інжектований потік у вхідному перерізі камери змішування, визначається з (2.9), відповідно  $f_{и} = 0,084 \text{ м}^2$ .

Площа вхідного перерізу камери змішування

$$f_2 = f_p + f_{и} = 0,031 + 0,084 = 0,115 \text{ м}^2.$$

Діаметр вхідного перерізу камери змішування  $d_2 = 0,389 \text{ м}$ .

Площа вихідного перерізу камери змішування визначається по (2.5), відповідно  $f_3 = 0,059 \text{ м}^2$ .

Діаметр вихідного перерізу камери змішування  $d_3 = 0,275 \text{ м}$ .

Визначаємо ентальпію стислого потоку

$$i_c = \frac{i_p + u i_{и}}{1 + u} = \frac{2756 + 0,282 \cdot 2564}{1 + 0,282} = 2714 \text{ кДж/кг.}$$

Визначаємо коефіцієнт корисної дії при  $u = 0,296$

$$\eta = \frac{u(i_c - i_n - T_{o.c}(s_c - s_n))}{i_p - i_c - T_{o.c}(s_p - s_c)} = \frac{0,282(2714 - 2564 - 300(7,77 - 8,35))}{2756 - 2714 - 300(6,76 - 7,77)} = 0,265.$$

### ЛІТЕРАТУРА

1. Дейч М. Е. Техническая газодинамика. – М.: Госэнергоиздат. 1961.
2. Соколов Е. Я., Зингер Н. М. Струйные аппараты. – М.: Энергия. 1970.

## Програма розрахунку ежектора (мова програмування – Pascal)

```

Program ежек; {Расчёт эжектора}
uses crt;
const path : string= 'D:\НТУ ХПИ\dat\'; {Путь к файлу. Указать самостоятельно}
var
Pp,Vp,Pi,Vi,Pc,Vc,Ppk,Pik,Pck,ap,ai,ac,kr,ki,kc,Pci,Ppc      : double;
Ppi,lpi,qpi,Pc3,lc3,qc3,Pi2,li2,qi2,Pps,lps,qps,Pc2          : double;
fi1,fi2,fi3,fi4,my,K1,K2,K3,K4,u,upr,du,zn1,zn2,zn3         : double;
J,a,W,b,Z,c,eps,alf,be,fkr,f2,f3,Gc,Gp,Gi,G,dkr,d2,d3,h     : double;
VG                                                           : integer;
f                                                             : text;
name                                                         : string;
Function st (x,y : double) : double;
begin
if x>0 then st:=exp(y*ln(x))
else Halt
end;
begin
clrscr;
write (' Имя файла выдачи - ');
read ( name );
name:=concat(path,name,'.dat');
writeln (' Результаты в файле - ',name);
assign (f,name);
rewrite (f);
writeln ('Исходные данные');
writeln ('Введите параметры рабочего потока');
write ('Pp [Па], Vp [м3/кг], kr, Ppk');
read (Pp,Vp,kr,Ppk);
write ('Введите параметры инжектируемого потока');
write ('Pi [Па], Vi [м3/кг], ki, Pik');
{5.4e3 26.4 1.13 0.579}
read (Pi,Vi,ki,Pik);
write ('Введите параметры сжатого потока');
write ('Pc [Па], Vc [м3/кг], kc, Pck');
{3.1e4 5.11 1.13 0.579}
read (Pc,Vc,kc,Pck);
write ('Введите скоростные коэффициенты fi1, fi2, fi3, fi4,');
{0.95 0.975 0.9 0.925}
read (fi1,fi2,fi3,fi4);
write ('Введите коэффициенты alf, be, my ');
{0.5 2 1.5}
read (alf,be,my);
writeln ('Какой расход задан');
writeln (' 1-расход рабочего пара');
writeln (' 2-расход сжатого пара');
writeln (' 3-расход инжектируемого пара');
{2}
read (VG);

```



```

write ('Расход пара [кг/с]');
{2.3}
read (G);
writeln (f, ' Результаты расчёта эжектора');
writeln (f, ' ');
ap:=sqrt(2*kp/(kp+1))*sqrt(Pp*Vp);
ai:=sqrt(2*ki/(ki+1))*sqrt(Pi*Vi);
ac:=sqrt(2*kc/(kc+1))*sqrt(Pc*Vc);
writeln (f, ' :2,ap, ' :5,ai, ' :5,ac');
writeln (f,ap:1:1, ' :2,ai:1:1, ' :2,ac:1:1);
writeln (f, ' ');
Pci:=Pi/Pc;
Ppc:=Pc/Pp;
Ppi:=Pi/Pp;
lpi:=sqrt(1-st(Ppi,(kp-1)/kp))*sqrt((kp+1)/(kp-1));
qpi:=lpi*st(0.5*(kp+1),1/(kp-1))*st(1-lpi*lpi*(kp-1)/(kp+1),1/(kp-1));
writeln (f, ' :2,lpi, ' :5,Ppi, ' :5,qpi');
writeln (f,lpi:1:4, ' :2,Ppi:1:4, ' :2,qpi:1:4);
writeln (f, ' ');
K1:=fi1*fi2*fi3;
K2:=fi2*fi3*fi4;
writeln (f, ' :2,K1, ' :5,K2);
writeln (f,K1:1:3, ' :2,K2:1:3);
writeln (f, ' ');
write (f, ' lc3, ' :5,Pc3, ' :5,qc3, ' :5,li2, ' :5,Pi2, ' :5,qi2, ' :5,Pc2, ' :5);
writeln (f,K3, ' :5,K4, ' :5,upr, ' :5,u, ' :7,du');
lc3:=1; h:=0.1;
while h>eps do
begin
repeat
Pc3:=st(1-lc3*lc3*(kc-1)/(kc+1),kc/(kc-1));
qc3:=lc3*st(0.5*(kc+1),1/(kc-1))*st(1-lc3*lc3*(kc-1)/(kc+1),1/(kc-1));
zn1:=1-((my*ac*ki*Pik*Pi)/(ai*kc*Pck*Pc*qc3));
upr:=(((my*ac*ki*Pik*Pi)/(ai*kc*Pck*Pc*qc3))-
((ap*ki*Pik*Pi)/(ai*kp*Ppk*Pp*qpi)))/zn1;
qi2:=upr/(((1+upr)*(be*ac*ki*Pik*Pi)/(ai*kc*Pck*Pc*qc3))-
((ap*ki*Pik*Pi)/(ai*kp*Ppk*Pp*qpi)));
a:=0.1; b:=1; eps:=1e-5;
J:=-((ki-1)/(ki+1))*st(a,ki+1)+st(a,ki-1)-2*st(qi2,ki-1)/(ki+1);
W:=-((ki-1)/(ki+1))*st(b,ki+1)+st(b,ki-1)-2*st(qi2,ki-1)/(ki+1);
if J*W<0 then
begin
repeat
c:=(a*W-b*J)/(W-J);
Z:=-((ki-1)/(ki+1))*st(c,ki+1)+st(c,ki-1)-2*st(qi2,ki-1)/(ki+1);
if J*Z<0 then
begin b:=c;
W:=Z;
end
else
begin
a:=c;
J:=Z;
end
end
end

```

```

end;
until ((abs(Z)<eps) or (abs(b-a)<eps)); end
else
writeln ('На этом отрезке нет корня');
li2:=c;
Pi2:=st(1-li2*li2*(ki-1)/(ki+1),ki/(ki-1));
Pc2:=Pci*Pi2;
zn2:=kp*Ppk*lc3*qi*be*ac;
K3:=1+fi3*Ppc*ap*(Pc3-Pci*(be-0.5*(be-1)*Pi2*(1+st(1/Pci,1-alf)*st(Pc3/Pi2,1-
alf))))/zn2;
zn3:=ac*ki*Pik*lc3*qi2*be;
K4:=1+fi3*ai*(1/Pci)*(Pc3-Pc2*(be-0.5*(be-1)*(1+st(1/Pci,1-alf)*st(Pc3/Pi2,1-
alf))))/zn3;
u:=(K1*lpi*ap/ac-K3*lc3)/(K4*lc3-K2*ai*li2/ac);
du:=abs((u-upr)/((u+upr)/2));
write (f,lc3:1:4,' ':2,Pc3:1:4,' ':2,qc3:1:4,' ':2,li2:1:4,' ':2,Pi2:1:4,' ':2,qi2:1:4,' ':2,Pc2:1:4);
writeln (f,' ':2,K3:1:3,' ':2,K4:1:3,' ':2,upr:1:4,' ':2,u:1:4,' ':2,du:1:4);
if u>upr then lc3:=lc3-h;
until upr>u;
h:=h/10;
writeln (f,' ');
end;
case VG of
1: Gp:=G;
2: Gp:=G/(u+1);
3: Gp:=G/u;
else end;
fkr:=Gp*ap/(kp*Pp*Ppk);
dkr:=sqrt(1.274*fkr);
writeln (f,' ');
f2:=(fkr/qi)+(u*Gp*ai/(ki*Pik*Pi*qi2));
d2:=sqrt(1.274*f2);
f3:=f2/be;
d3:=sqrt(1.274*f3);
writeln (f,' Площади характерных сечений');
writeln (f,' ':2,'fkr',' ':7,'f2',' ':6,'f3');
writeln (f,fkr:1:6,' ':2,f2:1:4,' ':2,f3:1:4);
writeln (f,' ');
writeln (f,' Диаметры характерных сечений');
writeln (f,' ':2,'dkr',' ':4,'d2',' ':5,'d3');
writeln (f,dkr:1:3,' ':2,d2:1:3,' ':2,d3:1:3);
writeln(' Расчет окончен. Нажмите "Esc" ');
repeat until ReadKey = #27;
readkey;
close (f);
end.

```

Таблиця Д.1 – Газодинамічні функції для перегрітої водної пари  $k=1,3$ 

$\lambda$	$\Pi$	$q$	$\lambda$	$\Pi$	$q$	$\lambda$	$\Pi$	$q$
0,02	0,9998	0,0319	0,92	0,6023	0,9925	1,82	0,08618	0,4400
0,04	0,9991	0,0637	0,94	0,5882	0,9958	1,84	0,08007	0,4204
0,06	0,9980	0,0955	0,96	0,5740	0,9982	1,86	0,07424	0,4010
0,08	0,9964	0,1271	0,98	0,5599	0,9996	1,88	0,06870	0,3818
0,10	0,9944	0,1581	1,00	0,5457	1,0000	1,90	0,06341	0,3628
0,12	0,9919	0,1900	1,02	0,5315	0,9995	1,92	0,05840	0,3441
0,14	0,9890	0,2212	1,04	0,5174	0,9982	1,94	0,05364	0,3,257
0,16	0,9855	0,2521	1,06	0,5032	0,9960	1,96	0,04915	0,3077
0,18	0,9818	0,2828	1,08	0,4891	0,9928	1,98	0,04491	0,2900
0,20	0,9776	0,3179	1,10	0,4750	0,9887	2,00	0,04092	0,2727
0,22	0,9729	0,3432	1,12	0,4611	0,9838	2,02	0,03717	0,2595
0,24	0,9679	0,3729	1,14	0,4471	0,9780	2,04	0,03366	0,2393
0,26	0,9623	0,4022	1,16	0,4333	0,9737	2,06	0,03038	0,2233
0,28	0,9564	0,4311	1,18	0,4196	0,9640	2,08	0,02732	0,2078
0,30	0,9501	0,4596	1,20	0,4050	0,9558	2,10	0,02448	0,1928
0,32	0,9434	0,4875	1,22	0,3925	0,9467	2,12	0,02185	0,1784
0,34	0,9363	0,5150	1,24	0,3791	0,9370	2,14	0,01942	0,1644
0,36	0,9288	0,5420	1,26	0,3659	0,9264	2,16	0,01718	0,1511
0,38	0,9209	0,5683	1,28	0,3528	0,9152	2,18	0,01513	0,1382
0,40	0,9127	0,5941	1,30	0,3399	0,9032	2,20	0,01325	0,1260-
0,42	0,9040	0,6193	1,32	0,3272	0,8908	2,22	0,01155	0,1144
0,44	0,8951	0,6438	1,34	0,3147	0,8773	2,24	0,01050	0,1033
0,46	0,8851	0,6677	1,36	0,3023	0,8634	2,26	0,00861	0,0929
0,48	0,8761	0,6909	1,38	0,2901	0,8489	2,28	0,00770	0,0831
0,50	0,8662	0,7133	1,40	0,2782	0,8338	2,30	0,00625	0,07392
0,52	0,8559	0,7351	1,42	0,2665	0,8182	2,32	0,00527	0,06531
0,54	0,8453	0,7561	1,44	0,2550	0,8020	2,34	0,00440	0,05735
0,56	0,8344	0,7763	1,46	0,2438'	0,7854	2,36	0,00364	0,04997
0,58	0,8233	0,7958	1,48	0,2327	0,7683	2,38	0,00298	0,04320
0,60	0,8119	0,8145	1,50	0,2219	0,7510	2,40	0,00241	0,03702
0,62	0,8002	0,8322	1,52	0,2114	0,7329	2,42	0,00192	0,03139
0,64	0,7883	0,8493	1,54	0,2011	0,7146	2,44	0,00151	0,02632
0,66	0,7760	0,8653	1,56	0,1911	0,6961	2,46	0,00117	0,02183
0,68	0,7637	0,8806	1,58	0,1814	0,6772	2,48	0,00089	0,01781
0,70	0,7511	0,8950	1,60	0,1719	0,6580	2,50	0,00066	0,01434
0,72	0,7384	0,9085	1,62	0,1627	0,6387	2,52	0,00048	0,01128
0,74	0,7253	0,9211	1,64	0,1538	0,6191	2,54	0,00034	0,00875
0,76	0,7122	0,9327	1,66	0,1452	0,5994	2,56	0,00024	0,00656
0,78	0,6989	0,9435	1,68	0,1368	0,5795	2,58	0,00015	0,00481
0,80	0,6854	0,9533	1,70	0,1287	0,5596	2,60	0,00010	0,00336
0,82	0,6718	0,9622	1,72	0,1209	0,5396	2,62	0,00006	0,00225
0,84	0,6581	0,9702	1,74	0,1134	0,5196	2,64	0,00003	0,00143
0,86	0,6443	0,9771	1,76	0,1062	0,4996	2,66	0,00002	0,00084
0,88	0,6304	0,9833	1,78	0,09922	0,4796	2,68	0,00001	0,00043
0,90	0,6194	0,9884	1,80	0,09256	0,4598	2,70	0,00000	0,00022

Таблиця Д.2 – Газодинамічні функції для насиченої водної пари  $k=1,13$ 

$\lambda$	$\Pi$	$q$	$\lambda$	$\Pi$	$q$	$\lambda$	$\Pi$	$q$
0,10	0,9948	0,1615	1,04	0,524	0,9983	1,98	0,0928	0,3916
0,12	0,9914	0,1937	1,06	0,5392	0,9958	2,00	0,0878	0,3768
0,14	0,9896	0,2251	1,08	0,5262	0,9928	2,02	0,0829	0,3619
0,16	0,9861	0,2565	1,10	0,5135	0,9896	2,04	0,0783	0,3472
0,18	0,9827	0,2876	1,12	0,5002	0,9845	2,06	0,0739	0,3332
0,20	0,9794	0,3186	1,14	0,4877	0,9797	2,08	0,0696	0,3190
0,22	0,9743	0,3497	1,16	0,4749	0,9740	2,10	0,0655	0,3056
0,24	0,9700	0,3791	1,18	0,4620	0,9668	2,12	0,0616	0,2920
0,26	0,9650	0,4088	1,20	0,4494	0,9594	2,14	0,0579	0,2789
0,28	0,9590	0,4378	1,22	0,4372	0,9543	2,16	0,0543	0,2660
0,30	0,9531	0,4666	1,24	0,4248	0,9431	2,18	0,0509	0,2535
0,32	0,9474	0,4951	1,26	0,4124	0,9336	2,20	0,0477	0,2415
0,34	0,9400	0,5223	1,28	0,4001	0,9235	2,22	0,0446	0,2297
0,36	0,9335	0,5505	1,30	0,3883	0,9132	2,24	0,0416	0,2183
0,38	0,9260	0,5761	1,32	0,3761	0,9016	2,26	0,0389	0,2072
0,40	0,9179	0,6017	1,34	0,3646	0,8905	2,28	0,0364	0,1963
0,42	0,9099	0,6269	1,36	0,3530	0,8781	2,30	0,0337	0,1859
0,44	0,9019	0,6680	1,38	0,3417	0,8658	2,32	0,0314	0,1769
0,46	0,8932	0,6755	1,40	0,3305	0,8529	2,34	0,0291	0,1661
0,48	0,8838	0,6983	1,42	0,3192	0,8388	2,36	0,0270	0,1568
0,50	0,8745	0,7206	1,44	0,3083	0,8249	2,38	0,0250	0,1478
0,52	0,8653	0,7424	1,46	0,2976	0,8110	2,40	0,0232	0,1392
0,54	0,8554	0,7632	1,48	0,2872	0,7962	2,42	0,0214	0,1308
0,56	0,8456	0,7834	1,50	0,2770	0,7816	2,44	0,01973	0,1188
0,58	0,8351	0,8025	1,52	0,2730	0,7661	2,46	0,01819	0,1151
0,60	0,8242	0,8204	1,54	0,2570	0,7510	2,48	0,01672	0,1077
0,62	0,8132	0,8379	1,56	0,2472	0,7350	2,50	0,01535	0,1006
0,64	0,8023	0,8547	1,58	0,2375	0,7187	2,52	0,01409	0,09406
0,66	0,7910	0,8704	1,60	0,2285	0,7031	2,54	0,01289	0,08767
0,68	0,7799	0,8855	1,62	0,2192	0,6861	2,56	0,01179	0,08163
0,70	0,7681	0,8994	1,64	0,2103	0,6698	2,58	0,01076	0,07586
0,72	0,7564	0,9126	1,66	0,2017	0,6532	2,60	0,00981	0,07042
0,74	0,7443	0,9248	1,68	0,1932	0,6366	2,62	0,00892	0,06522
0,76	0,7316	0,9355	1,70	0,1851	0,6199	2,64	0,00809	0,06052
0,78	0,7199	0,9463	1,72	0,1771	0,6032	2,66	0,00735	0,05577
0,80	0,7070	0,9568	1,74	0,1693	0,5859	2,68	0,00664	0,05140
0,82	0,6950	0,9643	1,76	0,1617	0,5695	2,70	0,00599	0,04727
0,84	0,6819	0,9714	1,78	0,1544	0,5529	2,72	0,00541	0,04350
0,86	0,6696	0,9786	1,80	0,1474	0,5366	2,74	0,00486	0,03986
0,88	0,6563	0,9838	1,82	0,1403	0,5195	2,76	0,00436	0,03649
0,90	0,6438	0,9892	1,84	0,1337	0,5162	2,78	0,00390	0,03331
0,92	0,6304	0,9925	1,86	0,1272	0,4865	2,80	0,00348	0,03199
0,94	0,6172	0,9952	1,88	0,1210	0,4707	2,82	0,00310	0,02760
0,96	0,6049	0,9984	1,90	0,1150	0,4544	2,84	0,00276	0,02506
0,98	0,5916	0,9992	1,92	0,1090	0,4387	2,86	0,00245	0,02268
1,00	0,5787	1,0000	1,94	0,1032	0,4221	2,88	0,00217	0,02052
1,02	0,5654	0,9993	1,96	0,0980	0,4071	2,90	0,00191	0,01849

Таблиця Д.3 – Газодинамічні функції для повітря  $k=1,4$ 

$\lambda$	$\Pi$	$q$	$\lambda$	$\Pi$	$q$	$\lambda$	$\Pi$	$q$
0,02	0,9998	0,0315	0,82	0,6597	0,9610	1,62	0,1336	0,6067
0,04	0,9990	0,0631	0,84	0,6454	0,9691	1,64	0,1248	0,5850
0,06	0,9979	0,0945	0,86	0,6310	0,9764	1,66	0,1163	0,5630
0,08	0,9963	0,1259	0,88	0,6165	0,9826	1,68	0,1081	0,5409
0,10	0,9942	0,1571	0,90	0,6019	0,9879	1,70	0,1003	0,5187
0,12	0,9916	0,1832	0,92	0,5873	0,9923	1,72	0,0928	0,4965
0,14	0,9886	0,2190	0,94	0,5726	0,9957	1,74	0,0856	0,4741
0,16	0,9851	0,2497	0,96	0,5579	0,9981	1,76	0,0787	0,4520
0,18	0,9812	0,2801	0,98	0,5431	0,9995	1,78	0,0722	0,4296
0,20	0,9768	0,3102	1,00	0,5283	1,000	1,80	0,0660	0,4075
0,22	0,9720	0,3401	1,02	0,5135	0,9995	1,82	0,0602	0,3855
0,24	0,9668	0,3696	1,04	0,4987	0,9980	1,84	0,0546	0,3638
0,26	0,9611	0,3987	1,06	0,4840	0,9957	1,86	0,0494	0,3423
0,28	0,9550	0,4274	1,08	0,4693	0,9924	1,88	0,0445	0,3211
0,30	0,9485	0,4557	1,10	0,4546	0,9880	1,90	0,0399	0,3002
0,32	0,9415	0,4835	1,12	0,4400	0,9829	1,92	0,0356	0,2797
0,34	0,9342	0,5109	1,14	0,4255	0,9768	1,94	0,0316	0,2596
0,36	0,9265	0,5377	1,16	0,4111	0,9698	1,96	0,0279	0,2400
0,38	0,9183	0,5640	1,18	0,3969	0,9620	1,98	0,0245	0,2209
0,40	0,9097	0,5897	1,20	0,3827	0,9531	2,00	0,0214	0,2024
0,42	0,9008	0,6149	1,22	0,3687	0,9435	2,02	0,0185	0,1845
0,44	0,8915	0,6394	1,24	0,3548	0,9331	2,04	0,0159	0,1672
0,46	0,8819	0,6633	1,26	0,3411	0,9217	2,06	0,0136	0,1507
0,48	0,8719	0,6865	1,28	0,3276	0,9096	2,08	0,0115	0,1348
0,50	0,8616	0,7091	1,30	0,3142	0,8969	2,10	0,0095	0,1198
0,52	0,8509	0,7309	1,32	0,3010	0,8831	2,12	0,00792	0,1055
0,54	0,8400	0,7520	1,34	0,2880	0,8688	2,14	0,00646	0,0921
0,56	0,8287	0,7724	1,36	0,2753	0,8538	2,16	0,00519	0,0795
0,58	0,8172	0,7920	1,38	0,2628	0,8380	2,18	0,00410	0,0678
0,60	0,8053	0,8109	1,40	0,2505	0,8216	2,20	0,00318	0,0570
0,62	0,7932	0,8288	1,42	0,2385	0,8046	2,22	0,00241	0,0472
0,64	0,7808	0,8459	1,44	0,2267	0,7869	2,24	0,00178	0,0408
0,66	0,7681	0,8623	1,46	0,2152	0,7687	2,26	0,00127	0,0290
0,68	0,7553	0,8778	1,48	0,2040	0,7499	2,28	0,00087	0,0234
0,70	0,7422	0,8924	1,50	0,1930	0,7301	2,30	0,00057	0,0175
0,72	0,7289	0,9061	1,52	0,1824	0,7110	2,32	0,00035	0,0124
0,74	0,7154	0,9189	1,54	0,1720	0,6909	2,34	0,00020	0,00834
0,76	0,7017	0,9308	1,56	0,1619	0,6703	2,36	$0,988 \cdot 10^{-4}$	0,00513
0,78	0,6878	0,9418	1,58	0,1522	0,6494	2,38	$0,413 \cdot 10^{-4}$	0,00277
0,80	0,6738	0,9518	1,60	0,1427	0,6282	2,40	$0,128 \cdot 10^{-4}$	0,00121

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО КУРСОВОГО ТА ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУВАННЯ  
“РОЗРАХУНОК ЕЖЕКТОРА“

для студентів фахів 7.095010 “Теплоенергетика”,  
і 7.000008 “Енергетичний менеджмент”

Укладачі: АКМЕН Роберт Генріхович  
ЖЕЛТОНОЖЕНКО Андрій Петрович

Відповідальний за випуск В.М. Кошельник

Роботу до видання рекомендував Ю. В. Шульгін

Редактор М.П. Єфремова

План 2008р., поз. 64/

Підп. до друку \_\_\_\_\_ Формат 60x84 1/16. Папір офсетн. Друк – ризографія.  
Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 2,3 Обл.-вид.арк \_\_\_\_\_ Тираж 50 прим.  
Зам. \_\_\_\_\_. Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ „ХПІ” 61002, Харків 2, вул. Фрунзе, 21  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №116 від 10.07.2000р.

---

Друкарня НТУ „ХПІ”, 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21