



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

ПРИЛОЖНА МЕХАНИКА НА ФЛУИДИТЕ

проф. д-р ИВАН. АНТОНОВ

<http://mfantonov.com>

ЛИТЕРАТУРА:



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

ИВАН. С. АНТОНОВ

**ПРИЛОЖНА МЕХАНИКА
НА ФЛУИДИТЕ**

*ВТОРО ПРЕРАБОТЕНО
И ДОПЪЛНЕНО ИЗДАНИЕ*

СОФИЯ
2016

15) ТЕЧЕНИЯ НА ВЛАЖНА ПАРА. ЧИСЛА НА ПОДОБИЕ. МЕХАНИЗЪМ И ЗОНИ НА КОНДЕНЗАЦИЯ В ЛОПАТЪЧНА РЕШЕТКА ОТ КОНФУЗОРЕН ТИП

Течения на влажна пара. Числа на подобие. Механизъм и зони на кондензация в лопатъчна решетка от конфузорен тип

Едно от често срещаните течения в топлосиловите инсталации и турбини е на влажна пара. При моделирането на това двуфазно течение в енергетичните установки съгласно [16,17] се правят следните допускания: а) Разглежда се двуфазна смес от пара и равномерно разпределени в нея течни капки; б) Приема се, че носещата фаза е непрекъсната и е идеален газ; в) Течението е едномерно, установено и монодисперсно; г) Не се отчита взаимодействието между частиците на дискретната фаза; д) Като определящи сили на междофазово взаимодействие се приемат тези от надлъжния градиент на налягане и вискозните напрежения; е) Равномерно разпределение на температурата; ж) Пренебрегва се свиваемостта на дискретната фаза.

В [16] се предлага на основата на горните приемания следната система уравнения, описващи движението на двуфазната среда:

$$5.128. \quad f_k \frac{\partial(\rho_g \alpha_g)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho_g \alpha_g V_g f_k)}{\partial z} = -V_{\phi n} f_k$$

$$5.129. \quad f_k \frac{\partial(\rho_p \alpha_p)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho_p \alpha_p V_p f_k)}{\partial z} = V_{\phi n} f_k$$

$$5.130. \rho_g \alpha_g \frac{\partial V_g}{\partial \tau} + \rho_g \alpha_g V_g \frac{\partial V_g}{\partial z} = V_{\phi n} (V_g - V_{gp}) - \frac{\partial(\alpha_g p)}{\partial z} - F$$

$$5.131. \rho_p \alpha_p \frac{\partial V_p}{\partial \tau} + \rho_p \alpha_p V_p \frac{\partial V_p}{\partial z} = V_{\phi n} (V_{gp} - V_p) - \frac{\partial(\alpha_g p)}{\partial z} + F$$

$$5.132. \rho_g \alpha_g \left(\frac{\partial h_{og}}{\partial \tau} + V_g \frac{\partial h_{og}}{\partial z} \right) = V_{\phi n} (h_{og} - h_{ogp}) + Q - N_f$$

$$5.133. \rho_p \alpha_p \left(\frac{\partial h_{op}}{\partial \tau} + V_p \frac{\partial h_{op}}{\partial z} \right) = V_{\phi n} (h_{ogp} - h_{op}) - Q + N_f$$

$$5.134. \frac{\partial r_k}{\partial \tau} + \left(\frac{3\rho_p \alpha_p V_p}{V_{\phi n} r_k} \right) \frac{\partial r_k}{\partial z} = 0$$

$$5.135. p = \rho_g R_g T_g,$$

където: индексите g и p се отнасят за парната и течностната фаза, τ - време, $V_{\phi n}$ - скорост на фазовия преход,

$h_o = h + V^2/2$ – енталпия в точката на заприщване, Q – топлина, приемана или отдавана от фазата в резултат от конвективния топлообмен, F – сили на междофазово взаимодействие, f_k – площ на напречното сечение на канала, N_F – мощност на силите от междофазово взаимодействие; r_k – радиус на капката. Сумата от обемните концентрации на фазите е равна на единица: $\alpha_g + \alpha_p = 1$.

Енталпиите на фазите се определят по изразите:

$$5.136. h_{og} = \frac{k_1}{(k_1 - 1)} \frac{p_{og}}{\rho_{og}} + const,$$

$$5.137. h_{op} = c_{pp} T_p + const,$$

където k_1 е показател на адиабатата, а c_{pp} – специфичен топлинен капацитет на примесите при постоянно налягане, J/kgK .

Скоростта на междофазовите превръщания, обменената топлина и мощността на силите на междофазово взаимодействие се определят по уравненията:

$$5.138. V_{\phi n} = 3\alpha_{pp} \rho_p V_p r_k^{-1} \frac{dr_k}{dz}$$

$$5.139. Q = 1,5\alpha_{pp} \alpha_1 \Delta T r_k^{-3}$$

$$5.140. N_F = F_{\Sigma} V_p - \frac{d(\alpha_p V_p)}{dz},$$

където: α_1 - коефициент на топлопредаване на носещата газова фаза, α_{pp} - коефициент на топлопредаване на фазата на примесите, F_{Σ} - сумата от силите на междофазовото взаимодействие.

Основните числа на подобие, дадени в [16], изведени на основата на интегралните условия на течението, са показани в табл.5.6 за съответните фази.

В таблицата е означено: λ - коефициент на топлопроводност, C_v - специфичен топлинен капацитет при постоянен обем, $Q_{\phi n}$ - топлина на фазовите преходи.

Табл.5.6

число на подобие	за носещата фаза	за дискретната фаза
Re	$\rho_g V_g l_g \mu_g^{-1}$	$\rho_p (V_g - V_p) l_p \mu_p^{-1}$
M	$\sqrt{\frac{(k_1 - 1)V_g}{2h_g}}$	$\frac{(V_g - V_p)}{a_g}$
Eu	$\frac{\rho_g}{(\rho_g V_g^2)}; \frac{1}{(k_g M_g^2)}$	$\frac{\rho_p}{(\rho_p V_p^2)}$
St	$\frac{(\rho_p V_p^2)}{C_R \rho_g (V_g - V_p)^2};$	$\frac{\rho}{C_R} \frac{v_g^2}{(1 - v_g^2)}$
Fr	$\frac{V_g^2}{(g l_g)}$	$\frac{V_g^2}{(g l_g)}$
We		$\rho_g (V_g - V_p)^2 \frac{l_p}{\sigma}$

число на подобие	за носещата фаза	за дискретната фаза
Sh	$\frac{l_g}{(\tau_g V_g)}$	$\frac{l_p}{(\tau_p V_p)}$
Pr	$\frac{\mu_g c_{pg}}{\lambda_g}$	$\frac{\mu_p c_{pp}}{\lambda_p}$
$Pe = Pr \cdot Re$	$\frac{V_g l_g}{a_g}$	$\frac{(V_g - V_p) l_p}{a_p}$
Nu	$\frac{l_g \alpha_{gg}}{\lambda_g}$	$\frac{l_p \alpha_{pp}}{\lambda_p}$
Време за динамична релаксация	$\frac{\rho_p l_p^2}{(\mu_g \tau_o)}, \tau_o$ характерно време за процеса	
Време за релаксация на температурата, τ_T	$\tau_T = \frac{\rho_p l_p^2 c_{vp}}{\lambda_p \tau_o}$	
Време за релаксация на фазовите преходи, $\tau_{\phi n}$	$\frac{\rho_p l_p^2 Q_{\phi n}}{\lambda_p T \tau_o}$	

Диаметърът на капките се препоръчва да се обезразмери по следния начин:

$$5.141. \bar{d}_k = d_k \frac{\dot{p}}{a_*} = -\frac{d_k}{\rho a_*} \frac{dp}{d\tau},$$

където скоростта на разширение се определя по израза

$$5.142. \dot{p} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{d\tau},$$

където a_* - критична звукова скорост на носещата (газова) фаза.

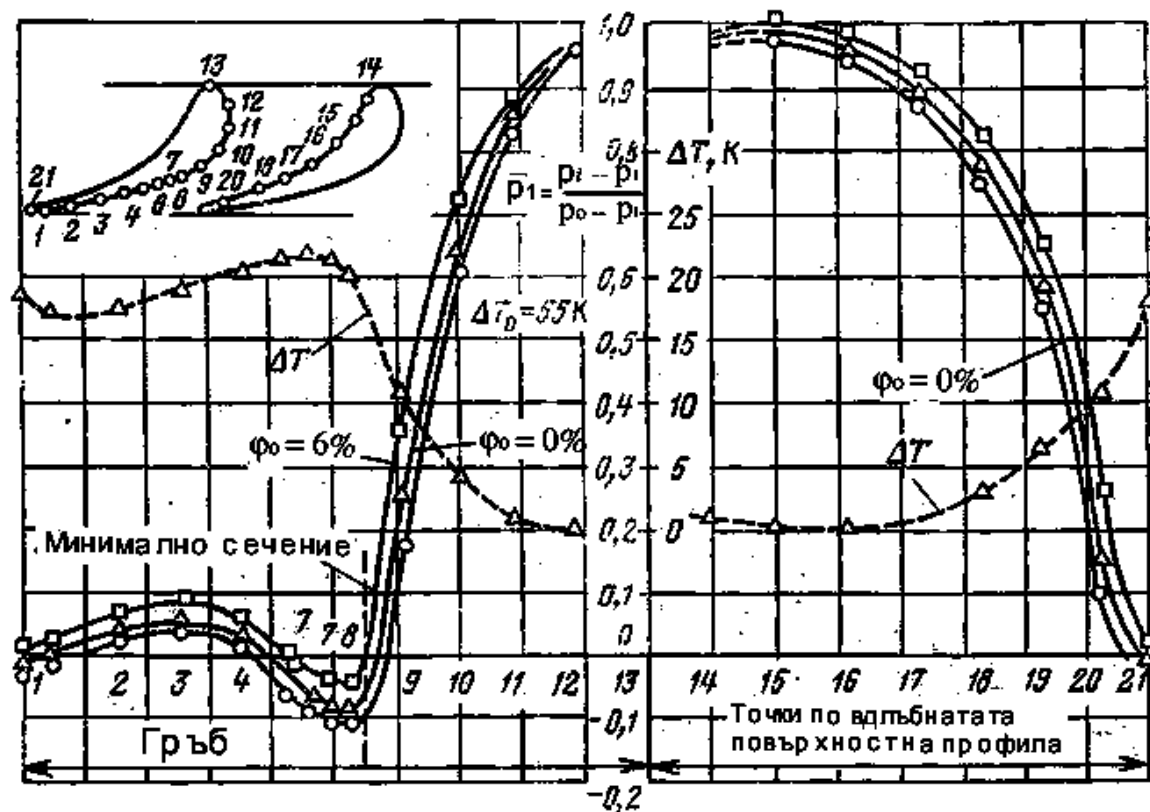
Началното състояние на двуфазната смес се определя по параметрите в точка на заприщване съответно за прегрята или влажна пара. Препоръчително е използване на един безразмерен параметър на течението, определящ състоянието на средата - например относителната енталпия.

Течение на влажна пара в решетките на турбини. Течението на влажна пара в лопатъчните решетки на турбомашините се налага да бъде изучавано по следните основни причини [16]: а) Необходимостта да се познават газодинамичните характеристики на течението при вариране в широк диапазон на режимните и геометричните параметри; б) Разработване на ефективни способи за намаляване на отрицателното влияние на кондензата в проточната част на турбината; в) Създаване на надеждни методи за корозионна и ерозионна защита на лопатките на турбината.

Съвсем накратко се дават някои експериментално получени резултати съгласно М.А.Дейч и Г.А.Филипов [17]. Разглеждат се процесите на преохлаждане и кондензация в междулопатъчните канали на една турбинна решетка.

При прехода от прегрята в суха, наситена и впоследствие влажна пара в турбинната решетка се наблюдава промяна на относителното налягане $\overline{p_1}$ след решетката и по повърхността на лопатките, определящи даден междулопатъчен канал.

Разглеждат се три случая: 1 - парата на входа на решетката е слабо прегрята, на изхода - суха прегрята; 2 - на входа наситена, след решетката - влажна; 3 - влажна пара на входа в решетката.



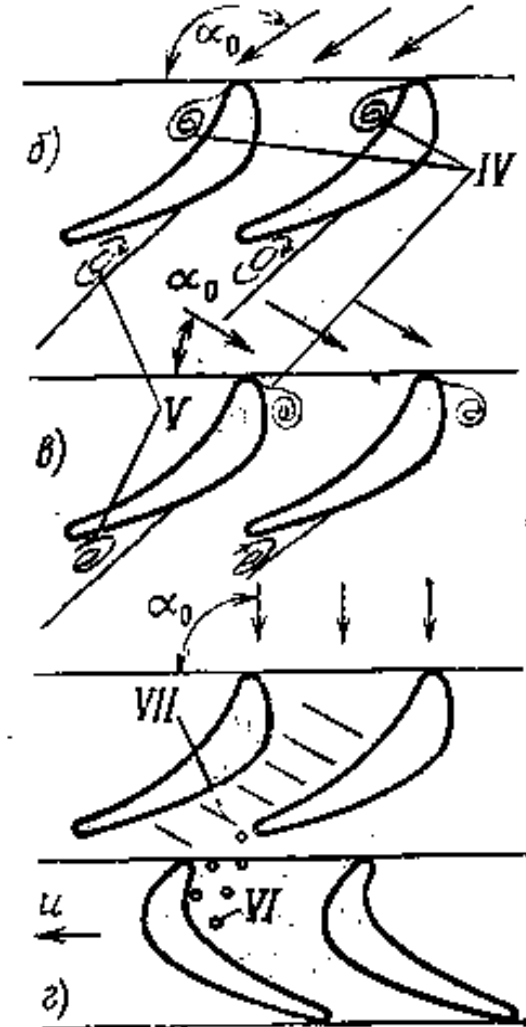
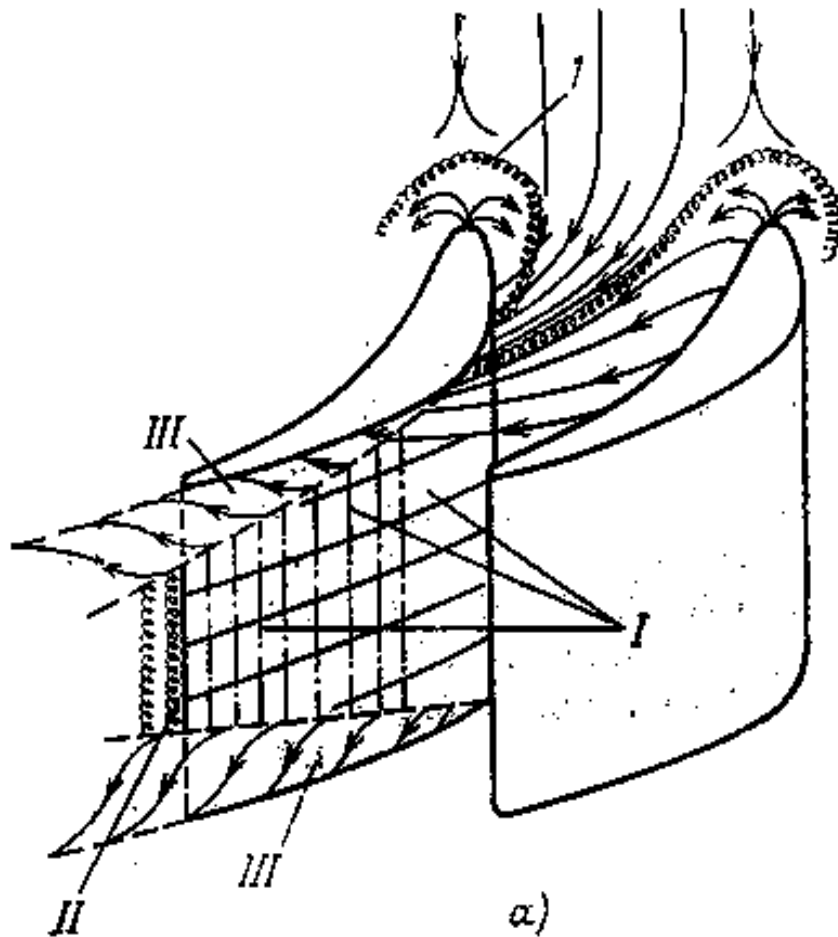
Фиг. 5.9

На фиг. 5.9 е показано разпределението на относителното налягане $\bar{p}_1 = (p_i - p_1) / (p_o - p_1)$ за лопатъчна решетка тип $C-9012A$, $M = 0,7$, $Re = 2,45 \cdot 10^5$, относителна стъпка $\bar{t} = 0,75$ по [17]. Налягането в точката на заприщване е p_o , а зад решетката - p_1 . В най-тесното сечение на междуплатъчния канал и на изходящия ръб на лопатките, където течението се откъсва и възниква вихрово движение, се получават минималните стойности на p_1 . В тази зона съществуват условия за възникване на частична кондензация, понижено налягане и температура, малка скорост на

течението, повишена възможност за взаимодействие между частиците на парата. Отбелязва се фактът, че в областта зад изходящия ръб на лопатките възникват вихрови образувания, които се откъсват и отнасят от течението. За участващите в този процес частици от парата се създават условия за кондензация. Това се доказва от направените в [16] измервания на влагосъдържанието в парата.

Пространственото разположение на зоните с вихрообразуване в междулопатъчните канали на реактивна лопатъчна решетка е показано на фиг. 5.10 по [16] : I - на гърба на лопатката; II - зад задния ръб на лопатката; III - крайни вихри, възникващи около ограничаващите канала стени; IV - вихрови шнурове около входящия ръб на лопатките.

В тези зони съществува максимално преохлаждане, съпроводено с кондензация на парата.



Фиг.5.10

Върху кондензацията на парата оказват влияние високата турбулентност и периодичната неустановеност на течението в проточната част на турбината, които възникват вследствие взаимодействието на решетките. То се дължи преди всичко на попадането на вихрови следи в междупатъчните канали на следващата лопатъчна решетка и периодично възникване на сгъстителни и разреждателни скокове в нея. Това създава условия за запазване на течна фаза. Освен това вихровите следи генерират допълнително турбулентност, което води също до ускоряване на процеса на кондензация.

Възникване на условия за кондензация в лопатъчните решетки е един много сложен проблем, върху който оказват влияние редица геометрични и газодинамични параметри - вихрообразуването, вълновите процеси, турбулентността и пр. Всички те са взаимосвързани и трудно може да бъдат изследвани поотделно.