

муються пульсації тиску РР в резонансному контурі, що дозволяє обґрунтовано вибирати профіль його проточної порожнини.

Встановлені границі зміни швидкості РР в окремих ділянках проточної порожнини нового гідравлічного вібраційного контуру в різні проміжки часу дозволили визначити режим течії РР в них, обґрунтовано використовувати різні математичні моделі для опису гідродинамічних процесів на різних його ділянках.

#### Література

1. Дмитрієнко О. В., Гречка І. П. Дослідження впливу параметрів нового гідравлічного вібраційного контуру гідроапарату на його коефіцієнт підсилення // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2005. – № 39. – С. 83 – 88.
2. Шорин В.П. Устранение колебаний в авиационных трубопроводах – М.: Машиностроение, 1980. – 156 с.
3. Kollek W., Kudzma Z., Rutanski J. Halas jako kryterium oceny jakosci i konkurencyjnosci maszyn z napędem hydrostatycznym // Napedy i Sterowania Hydrauliczne'93. Konferencja Naukowo-Techniczna, Wroclaw, 1993. – S. 309–317.

4. Kollek W., Kudzma Z., Rutanski J. Mozliwosci skutecznego tlumienie halasu ukladem Filtrow akustycznych // V Konferencja. Rozwoj Bodowy Eksploatacji i Badan Maszyn Roboczych Cieczkih. Zakopane, 1992. – S. 203 – 208.
5. Фінкельштейн З.Л., Дмитрієнко О.В. Розрахунок характеристик удосконаленого гасителя пульсацій // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету – 2008. – №2. Ч. 2. – С. 125 – 128.
6. Андренко П.М., Дмитрієнко О.В. Математичні моделі і розрахункові дослідження гідравлічних гасителів і підсилювачів пульсацій тиску // Східно – Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2004. – № 5(11). – С. 88–93.
7. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика: Учеб. для вузов. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1987. – 440 с.
8. Андренко П.Н., Григорьев А.Л., Лурье З.Я., Скляревский А.Н. Интерференция волн давления в элементах объемных гидроагрегатов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Харьков, 2008. – № 6/5 (36). – С. 35 – 47.
9. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973.– 847 с.

УДК 629.7.035.03-036.34

## КРИЗА В'ЯЗКОЇ ТЕЧІЇ В АЕРОДИНАМІЧНИХ РЕШІТКАХ

**Ю. М. Терещенко**

Доктор технічних наук, професор\*  
Контактний тел.: 8-044-406-75-93

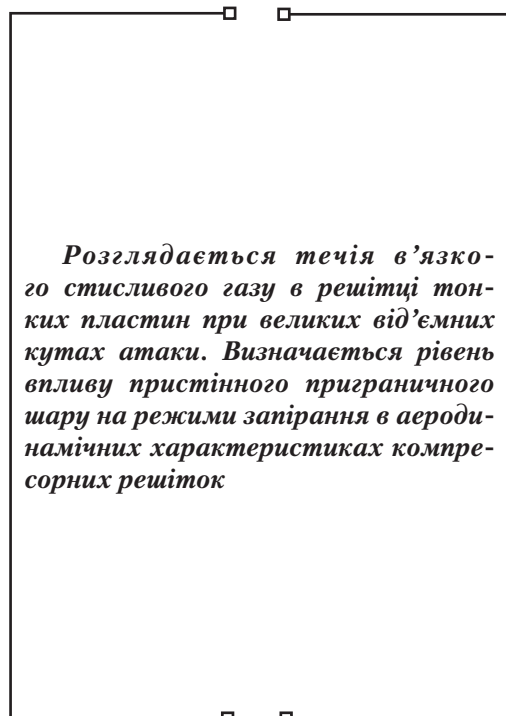
**Ю. Ю. Терещенко**

Інженер\*  
Контактний тел.: 8-044-406-75-93

**С. Ю. Гуз**

Науковий співробітник\*  
Контактний тел.: 8-044-406-70-58

\*Кафедра авіаційних двигунів  
Національний авіаційний університет  
пр-т Космонавта Комарова, 1 корп.1, к. 1.112, м.Київ



*Розглядається течія в'язкого стисливого газу в решітці тонких пластин при великих від'ємних кутах атаки. Визначається рівень впливу пристінного приграничного шару на режими запірання в аеродинамічних характеристиках компресорних решіток*

#### Вступ

Аеродинамічний розрахунок ступенів осьового компресора починається з розрахунку течії повітря в елементарних ступенях, які моделюються решітками аеродинамічних профілів.

З використанням аеродинамічних характеристик компресорних решіток розраховуються характеристики ступенів осьового компресора та визначаються характерні обмеження режимів його роботи.

До основних обмежень режимів роботи ступеня компресора належать великих додатних кутах атаки,

та режими запирання ступенів компресора за витратою повітря.

Відривні течії широко розповсюджені в природі та практиці і їх опис важливий для інженерних розрахунків. Оскільки виникнення відриву є результатом в'язкої - нев'язкої взаємодії шарів течії, для його передбачення необхідно точно моделювати як в'язкі, так і нев'язкі процеси. При цьому необхідно враховувати, що вони взаємодіють нелінійно.

Відомо, що розташування точки відриву залежить обмеження за газодинамічною стійкістю, обумовлені відриванням потоку при відстані пограничного шару перед зоною взаємодії. Турбулентний пограничний шар більш стійкий до відриву, оскільки в'язке зсувне напруження, що протидіє градієнту тиску, в турбулентному шарі вище, ніж в ламінарному. Отже, при дослідженні відривних течій необхідно враховувати та досить точно моделювати стан пограничного шару.

**Аналіз досліджень і публікацій**

На даний час виконано низка досліджень з питань визначення параметрів та характеристик компресорних решіток. На підставі аналізу результатів цих досліджень отримано залежності, які дозволяють прогнозувати появу режимів запирання компресорних решіток та ступенів осьового компресора за витратою повітря.

На рис.1 зображено характеристику компресорних решіток у потоці ідеального газу, яка дозволяє оцінювати появу режимів запирання компресорних решіток в залежності від відношення площі проходного перерізу горла до площі нормального перерізу на вході в решітку ( $F_r / F_1$ ).

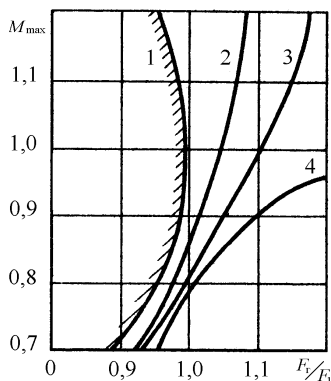


Рисунок 1. Залежності значення  $M_{max}$  для решітки аеродинамічних профілів від відношення  $F_r / F_1$ : 1 – теоретична залежність; 2 – надзвукові решітки (експеримент); 3 – трансзвукові решітки (експеримент); 4 – дозвукові решітки (експеримент)

При течії реального газу в компресорній решітці на поверхні профілів формується пристінний приграничний шар. Внаслідок його створення зменшується площа проходного перерізу горла міжлопаткових каналів, що в свою чергу, впливає на режим течії та виникнення режимів запирання.

**Постановка задачі**

Урахування впливу стискуваності і в'язкості потоку передбачає необхідність досить точного визначення розташування та інтенсивності зон відриву, а також корекції кута установки профілів і густоти решітки, розрахованої для нев'язкого потоку при різних числах М. Метою даного дослідження було визначення рівня впливу в'язкості реального потоку на режими запирання у решітці тонких пластин. Така постановка задачі дозволяє визначити вплив саме в'язкості реального потоку на режими запирання компресорних решіток без урахування особливостей аеродинамічної форми профілів (без урахування "тілесності" профілів). Геометричні параметри решітки пластин (густина  $(\frac{t}{b})$ , кути встановлення пластин у решітці -  $\gamma$ ) відповідають аналогічним параметрам для решіток з аеродинамічних профілів.

**Загальна характеристика режимів "запирання"**

На режимах запирання течію повітря в компресорній решітці можна розмежовувати на ділянки конфузорної (до горла) та дифузорної (за горлом) течії (2).

Якщо течія потоку в горлі міжлопаткових каналів відповідає умові  $w_r = a_{кр}$ , то виникає режим запирання з максимально можливою витратою повітря.

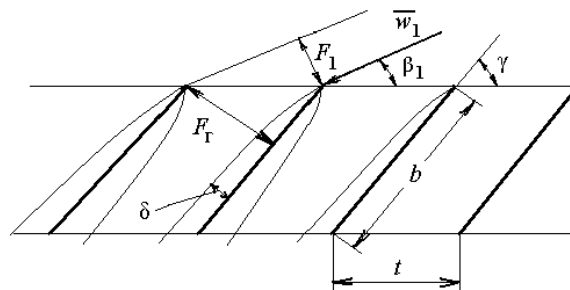


Рисунок 2. Схема течії в решітці тонких пластин

На рис.2 позначено:  $w_1$  – вектор швидкості на вході в решітку;  $\gamma$  – кут установки профілів в решітці;  $\beta_1$  – кут входу потоку;  $b$  – хорда профілю;  $t$  – шаг решітки;  $F_1$  – площа нормального перерізу на вході в решітку;  $F_r$  – площа "горла" міжлопаткового каналу;  $\delta$  – товщина приграничного шару на поверхні профілю.

**Аналіз течії в'язкого стискуваного газу в решітці тонких пластин**

Розглянемо течію газу в решітці тонких пластинок (рис.1) для двох випадків: течії нев'язкого стискуваного газу і течії в'язкого стискуваного газу.

Для течії нев'язкого газу рівняння витрат для перерізів  $F_1$  і  $F_r$  запишемо у вигляді:

$$mF_1 \frac{P_1^*}{\sqrt{T_1^*}} q(\lambda_1) = mF_r \frac{P_r^*}{\sqrt{T_r^*}} q(\lambda_r) ,$$

Де  $m$  – коефіцієнт витрати повітря, що враховує особливості фізичних властивостей робочого тіла, рівний  $m = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \sqrt{\frac{k}{R}}$ ;  $R$  – газова стала;  $F_1$  – площа нормального перерізу на вході в решітку;  $F_r$  – площа “горла” міжлопаткового каналу;  $P_1^*, T_1^*$  – повний тиск і температура в перерізі  $F_1$ ;  $P_r^*, T_r^*$  – повний тиск і температура в “горлі” міжлопаткового каналу;  $q(\lambda_r)$ ,  $q(\lambda_1)$  – відносна густина току в характерних перерізах.

Із умови  $P_1^* = P_r^*$  і  $T_1^* = T_r^*$ , отримуємо:

$$\frac{q(\lambda_r)}{q(\lambda_1)} = \frac{F_1}{F_r} = \frac{t \cdot \sin \beta_1}{t \cdot \sin \gamma};$$

$$\frac{q(\lambda_r)}{q(\lambda_1)} = \frac{\sin \beta_1}{\sin \gamma};$$

$$q(\lambda_1) = q(\lambda_r) \frac{\sin \gamma}{\sin \beta_1}.$$

Для режиму “запирання” значення функції витрат в перетині  $F_1$ , яке відповідає режиму критичної течії в горлі  $F_r$ , має вигляд:

$$q(\lambda_1) = \frac{\sin \gamma}{\sin \beta_1}. \tag{1}$$

Величина  $M_{\max} = \frac{w_1}{a}$ , що відповідає виникненню критичної течії в “горлі” міжлопаткового каналу, визначається виразом:

$$M_{\max} = \left(\frac{\frac{k+1}{2}}{1 + \frac{k-1}{2} M_{\max}^2}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} = \frac{\sin \gamma}{\sin \beta_1}. \tag{2}$$

Для течії в'язкого газу в решітці рівняння нерозривності течії в міжлопатковому каналі з урахуванням приграничного шару запишеться у вигляді:

$$m F_1 \frac{P_1^*}{\sqrt{T_1^*}} q(\lambda_1) = m (F_r - \delta^*) \frac{P_r^*}{\sqrt{T_r^*}} q(\lambda_r),$$

де  $\delta^*$  – товщина витіснення при граничного шару в перерізі  $F_r$ .

При  $P_1^* = P_r^*$  і  $T_1^* = T_r^*$  отримуємо:

$$\frac{F_1}{(F_r - \delta^*)} = \frac{q(\lambda_r)}{q(\lambda_1)} \cdot \frac{q(\lambda_r)}{q(\lambda_1)} = \frac{t \cdot \sin \beta_1}{(t \cdot \sin \gamma - \delta^*)} \cdot \frac{\sin \beta_1}{\left(\frac{\sin \beta_1}{\sin \gamma - \frac{\delta^*}{t}}\right)} = \frac{q(\lambda_r)}{q(\lambda_1)}$$

Для режиму “запирання” при  $q(\lambda_r) = 1$  отримуємо:

$$q(\lambda_1) = \frac{\left(\sin \gamma - \frac{\delta^*}{t}\right)}{\sin \beta_1}; \tag{3}$$

де  $\frac{\delta^*}{t}$  – відносна товщина витіснення приграничного шару на поверхні профіля в районі “горла”;  $t$  – шаг решітки  $\left(t = b \cdot \frac{t}{b}\right)$ ;  $b$  – хорда профіля;  $\frac{t}{b}$  – густина решітки.

Для потоку в'язкого газу режим запирання решітки визначається виразом:

$$M_{\max} = \left(\frac{\frac{k+1}{2}}{1 + \frac{k-1}{2} M_{\max}^2}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} = \frac{\sin \gamma - \frac{\delta^*}{t}}{\sin \beta_1} \tag{4}$$

Для оцінки впливу параметрів приграничного шару на режими “запирання” компресорних решіток використаємо метод визначення інтегральних характеристик турбулентного приграничного шару в горлі міжлопаткового каналу, змінюючи його товщину за довжиною профіля, залежністю виду:

$$\delta_r = kx_r \cdot \frac{1}{\sqrt[5]{Re_r}}.$$

У цьому виразі:  $x_r$  – координата перерізу горла міжлопаткового каналу (від носка профіля);  $k$  – коефіцієнт, що характеризує геометричні параметри решітки і визначається за даними експериментальних досліджень (для решіток із тонких пластинок з густиною  $\frac{b}{t} < 1,5$  і коефіцієнтом  $k \approx 0,37$ );  $Re_r = \frac{w \cdot x_r}{\nu}$  – критерій Рейнольдса для точки з координатою  $x_r$ .

Для компресорних решіток точка переходу ламінарного приграничного шару в турбулентний розташована біля вхідної кромки лопатки і тому розрахунок приграничного шару як для турбулентного можна здійснити за всією довжиною хорди лопатки.

Товщина витіснення для перерізу в горлі міжлопаткового каналу буде визначатися формулою:

$$\delta_r^* = \delta_r \cdot \frac{1}{n+1},$$

де коефіцієнт  $n = 1,43 \dots 2,5$ .

Для решіток з густиною  $\frac{b}{t} = 0,8 \dots 1,5$  із слабо зігнутих пластин з хордою  $b = 80 \dots 120$  мм, кутами установки  $= 38 \dots 45^\circ$ , параметрами потоку, що відповідають числам  $Re = 3 \dots 5 \cdot 10^5$ , товщина витіснення імпульсу –  $\delta^{**} = 0,3 \dots 0,4$  мм.

Виходячи з того, що інтегральні характеристики приграничного шару пов'язані між собою співвідношенням:

$$\frac{\delta^*}{\delta^{**}} = \frac{2+n}{n}, \tag{5}$$

отримуємо, що товщина витіснення приграничного шару в перерізі горла міжлопаткового каналу в решітці з вказаними параметрами, складає:

$$\delta^* = \delta^{**} \cdot \frac{2+n}{n} = 0,76 \dots 0,92 \text{ мм.}$$

Одержуємо значення  $M_{\max}$  за формулою (4) з урахуванням товщини витіснення при граничного шару за формулою (5) і можемо оцінити вплив в'язкості газу на “запирання” ступенів осьового компресора. На рис.2 показані значення  $M_{\max}$ , розраховані для течії невіязкого газу в решітці пластин за залежністюю

$$M_{\max} = f\left(\frac{F_r}{F_1}\right),$$

з урахуванням впливу приграничного шару на потік в міжлопаткових каналах.

На рис.3 зображено розрахункові залежності значення  $M_{max}$  для течії невязкого газу в решітці пластин без урахування приграничного шару, та  $M^*_{max}$  з урахуванням впливу приграничного шару на потік в міжлопаткових каналах.

Аналіз цих залежностей свідчить про те, що внаслідок впливу в'язкості реального потоку суттєво зменшуються значення швидкості на вході в решітку, при яких трапляється запирання горла міжлопаткового каналу за умовою максимальної витрати повітря. Для решітки пластин розбіжність у значеннях  $M_{max}$  та  $M^*_{max}$  складає від 5 до 15%.

Порівняння характеристик режимів запирання для решіток пластин (рис.3) та експериментальних даних для решіток з аеродинамічних профілів (рис.1) свідчить про достатню коректність запропонованого метода розрахунку.

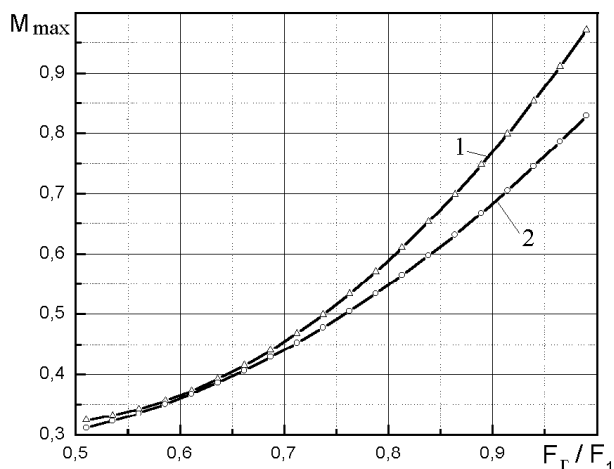


Рисунок 3. Залежності значення  $M_{max}$  для решітці пластин від відношення  $F_r / F_1$  :  
1-  $M_{max}$ ; 2 -  $M^*_{max}$

Визначені за допомогою формул (3) та (4) значення  $M^*_{max}$  за якісними ознаками співпадають з результатами експериментальних досліджень, зображених на рис.1 ( криві 2-4).

Продовження досліджень у даному напрямку повинно бути спрямоване на визначення розрахункових

залежностей для оцінювання впливу в'язкості потоку на характеристики дозвукових та надзвукових решіток тілесних профілів.

### Висновки

1. Запропонована методика дозволяє здійснювати оцінку впливу в'язкості потоку на аеродинамічні характеристики решіток пластин під час їх обтікання з великими від'ємними кутами атаки. Порівняння характеристик режимів запирання для решіток пластин та експериментальних даних для решіток з аеродинамічних профілів свідчить про достатню коректність запропонованого метода розрахунку.

2. Врахування в'язкості потоку приводить до зменшення розрахункового значення  $M_{max}$ , що відповідає режиму запирання компресорних решіток за витратою повітря. Для решітки пластин розбіжність у значеннях  $M_{max}$  та  $M^*_{max}$  складає від 5 до 15% .

3. Метою подальшого дослідження є отримання результатів та аналіз впливу особливостей аеродинамічної форми профілів лопаток решіток на режими запирання решіток у потоці в'язкого газу.

### Література

- 1.Терещенко Ю.М., Мітрахович М.М. Авіаційні газотурбінні дмгуні.-К.:КВІЦ, 2001.-312 с.
- 2.Терещенко Ю.М. Ааэродинамика компрессорных решеток .-М.: Машиностроение, 1979.-120с.
3. Федоров Р.М. Устойчивость течения воздуха в компрессорах ГТД // Труды объединенных чтений по космонавтике, посвященные памяти выдающихся советских ученых – пионеров освоения космического пространства. Двигатели летательных аппаратов.- М.:АН ССР, 1980- С.61-73.
- 4.Терещенко Ю.М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров. М: Машиностроение, 1987.168 с.
- 5.Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин.- М: Машиностроение, 1970.-603 с.
- 6.Терещенко Ю.М., Бойко Л.Г., Дмитрієв С.О. та ін. Теорія теплових двигунів. – Київ: Вища школа, 2001.-382 с.