

УДК 629.735.083.02.06(045)

Ю.М. ТЕРЕЩЕНКО, докт. техн. наук, проф., НАУ, Київ,
І.О. ЛАСТІВКА, канд. техн. наук, зав.каф., НАУ, Київ,
К.В. ДОРОШЕНКО, канд. техн. наук, асис., НАУ, Київ

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ В ЕЛЕМЕНТАХ СТАТОРА ГТД ІЗ ГАЗОДИНАМІЧНИМ ВПЛИВОМ НА АЕРОДИНАМІЧНІ СЛІДИ

У роботі представлені результати чисельного моделювання дозвукової течії в ГТД з газодинамічним впливом на аеродинамічні сліди

Ключові слова: моделювання течії, решітка профілів, газодинамічний вплив, примежовий шар

В работе представлены результаты численного моделирования дозвукового течения в ГТД с газодинамическим управлением аэродинамическими следами.

Ключевые слова: моделирование течения, газодинамическое управление, пограничный слой

Results of simulation of subsonic flow in gas-turbine engine by the gas-dynamic control of aerodynamic trails are presented in the work.

Keywords: flow simulation, gas-dynamic control, boundary layer

1. Вступ

Однією з складних проблем, що виникають при створенні газотурбінної силової установки для сучасного літака, є наявність нерівномірності потоку на вході в вентилятор, яка негативно впливає на характеристики двигуна в цілому, зокрема на рівень шуму, що створюється авіаційною силовою установкою.

Як показано в роботах [1, 2, 3, 4, 5] та ін. фізичні основи виникнення періодичної колової нерівномірності потоку в проточній частині газотурбінного двигуна полягають в утворенні аеродинамічних слідів за елементами статора через явище в'язкості повітряного потоку. Інтенсивність даних слідів може бути визначена на основі співвідношень теорії примежового шару. Повітряний потік за елементами статора істотно неоднорідний, і на лопатки робочого колеса діятиме змінна аеродинамічна сила. Крім того, дана періодична колова нерівномірність потоку у ряді випадків проходить через всі ступені осьового компресора, негативно впливаючи на їх роботу і навіть на роботу газової турбіни.

У сліді позаду нерухомого тіла швидкість і повний тиск менші, ніж в зовнішній течії. Таке пониження швидкості і повного тиску означає, що тут відбувається втрата імпульсу, причиною якої є опір тіла.

У роботі [6] приводяться можливі способи зменшення рівня періодичної колової нерівномірності потоку: установка перед робочим колесом вхідного направляючого апарату з тонкими лопатками, що повертають потік; застосування конфузornoї течії перед робочим колесом; застосування колеса "вертушки", що вільно обертається, перед робочим колесом. Проте в цих випадках не

відбувається повного усунення періодичної колової нерівномірності потоку, а крім того все це призводить до істотного збільшення габаритів двигуна, його ваги, до ускладнення конструкції. Оскільки основною причиною нерівномірності потоку є в'язкі ефекти, які головним чином пов'язані з відривом примежового шару, управління останнім може виявитися ефективним засобом зменшення колової нерівномірності, а також, як наслідок, зниження генерування акустичного випромінювання. Причини звернення до газодинамічних методів управління обтіканням елементів вентилятора у вигляді управління примежовим шаром для впливу на структуру аеродинамічних слідів за елементами статора вентилятора були обґрунтовані у роботах [7, 8, 9, 10] і ін. Ці причини полягають у тому, що при обтіканні потоком аеродинамічного профілю (навіть симетричного і під нульовим кутом атаки) статичний тиск в примежовому шарі менший, ніж у вільному потоці (ядрі потоку), тому примежовий шар не в змозі подолати позитивний градієнт тиску $+\Delta P$ на поверхні профілю і в цих зонах відбувається його відрив. Відриву можна запобігти або частково локалізувати його, а інтенсивність нерівномірності потоку за вихідними кромками зменшити шляхом енергетичного впливу на примежовий шар течії в пристінних областях [7, 10] – здування або відсмоктування повітря з поверхні профілю.

Не дивлячись на різноманіття методів підходу до вирішення задач щодо управління примежовим шаром, різного роду припущень і обмежень, вибору розрахункових схем управління примежовим шаром і ін., в принципі питання про застосування управління примежовим шаром зводиться до реалізації видування повітря через щілину у напрямі основного потоку по дотичній в даній точці профілю для збільшення кінетичної енергії примежового шару [11, 12, 13]. Цим забезпечується створення стійкої течії у напрямі несприятливого градієнта тиску.

2. Задача дослідження

В даній роботі розглядається задача моделювання течії в елементах статора газотурбінного двигуна з газодинамічним впливом на аеродинамічні сліди з метою зменшення рівня колової нерівномірності потоку в залежності від імпульсу видуву.

3. Розв'язання задачі і аналіз результатів

Газодинамічного управління циркуляцією навколо профілів (управління примежовим шаром), яке використовується в аеродинаміці, істотно впливає на інтенсивність аеродинамічних слідів за вихідними кромками тіл, що обтікаються в'язким потоком. До таких методів відноситься видув газу в пристінний примежовий шар на профілі з імпульсом, що визначається інтегральними характеристиками примежового шару. На рис. 1, 2 представлені розрахункові схеми управління аеродинамічними слідами за елементами статора осьового компресора за допомогою видуву даткової маси газу (повітря) в примежовий шар через щілини на поверхні лопатки.

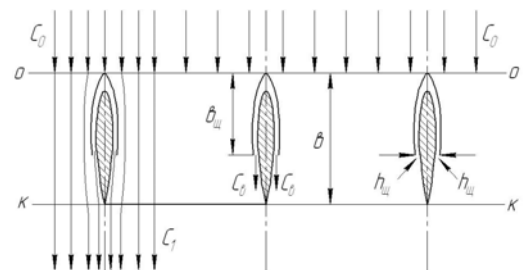


Рис. 1. Схема решітки з газодинамічним впливом на аеродинамічні сліди

Розрахунок газодинамічного управління течією в елементах компресорів ГТД полягає у визначенні параметрів управляючого потоку, який впливає на характер течії. Визначення цих параметрів необхідне для оцінки ефективності та економічності газодинамічного впливу на характер течії в аеродинамічних слідах. У цих випадках, зазвичай, керуються наступними рекомендаціями: щілини на поверхнях з управлінням примежовим шаром розташовані до точки відриву потоку на профілі [7, 8, 10]; параметри струменя, що видувається в примежовий шар, визначаються з умови забезпечення заданого ступеня нерівномірності потоку на різному віддаленні від вихідного перерізу профілю. Розташування щілин до точки відриву обумовлене тим, що газодинамічна дія на течію в примежовому шарі може бути ефективною і економічною лише при безвихровій течії, а при розташуванні щілини за точкою відриву потоку ефективність газодинамічного управління різко знижується [5].

Оцінку ефективності управління примежовим шаром при видуві повітря в пристінний примежовий шар проводять на основі теоретичних і експериментальних досліджень по інтенсивності управління примежовим шаром, що характеризується, зазвичай, безрозмірним параметром – коефіцієнтом імпульсу видуву у вигляді [10]:

$$c_{\mu} = \frac{m_g c_g}{q_0 S_0} \quad \text{або} \quad c'_{\mu} = \frac{m_g c_g}{q_0 S'}$$

де m_g – секундна витрата маси повітря, що видувається; c_g – швидкість видувного повітря; S_0 – площа поверхні профілю; S' – площа поверхні частини профілю, що відповідає протяжності управління примежовим шаром; q_0 – швидкісний напір основного потоку повітря.

Для випадку управління примежовим шаром в решітках профілів ВНА в роботах [10, 12] рекомендується наступна формула для c_{μ} :

$$c_{\mu} = K \frac{\rho_g c_g^2}{\rho_0 c_0^2} \bar{h}_{щ} \frac{b}{t} \frac{1}{\sin \gamma}$$

де ρ_g , ρ_0 і c_g , c_0 – густина і швидкість видувного і основного потоків повітря; $\bar{h}_{щ} = h_{щ} / b$ – відносна висота щілини; b/t – густина решітки; γ – кут між вектором абсолютної швидкості потоку повітря і фронтом решітки; K – коефіцієнт, що залежить від кількості щілин на профілі.

Швидкість потоку при видуві повітря c_g рекомендується [10] визначати відповідно до припущення про ізотропічне розширення повітря від повного тиску p_g^* усередині лопатки до статичного p_0' в набігаючому потоці. Як пропонується в

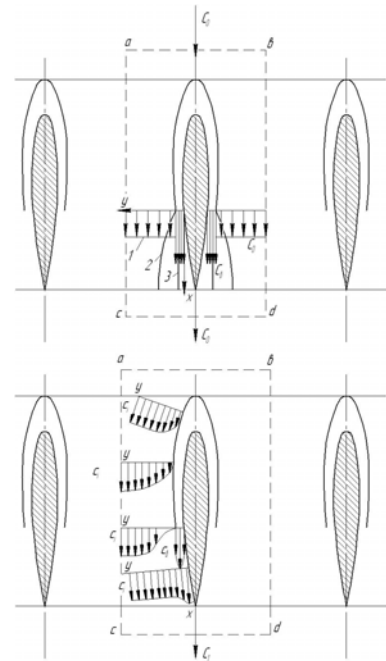


Рис. 2. Розрахункова схема течії в примежовому шарі

роботі [13], середня швидкість витікання струменя c_e повинна в достатній мірі перевищувати швидкість набігаючого потоку ($c_e \geq 1.2 - 1.25c_0$). Інакше видув може бути навіть шкідливий. Вибір розташування щілин залежить від конструктивних і аеродинамічних особливостей даної системи. У роботі [10] було проведено дослідження профілів з відносним положенням щілини по хорді профілю $\bar{b}_{щ} = (b_{щ} / b) = 50\% - 70\%$ з управлінням примежовим шаром. У роботі [13] показано, що управління циркуляцією потоку на профілях суттєво впливає на значення втрат повного тиску в решітках, зменшуючи його із збільшенням c_{μ} .

На рис.3 представлена твердотільна модель вхідного направляючого апарату двоконтурного турбореактивного двигуна.

В якості робочого тіла вибрано стискуване в'язке повітря за нормальних атмосферних умов. Абсолютна швидкість повітря на вході $c_0 = 160\text{м/с}$; витрата повітря, що видувається, в межах $0.05 - 0.3\text{ кг/с}$.

З метою коректної поставки умови періодичності розрахункова область обмежена боковими поверхнями, проведеними по середніх лініях току в сусідніх міжлопаткових каналах.

Було побудовано розрахункові нерегулярні сітки з призматичним шаром однакової топології і розмірності, які склалися з порядку 1млн. вузлів. На першому етапі чисельного експерименту було змодельовано течію у вентиляторі без газодинамічного управління течією і на основі розрахунків обчислено інтегральні характеристики пограничного шару і точку відриву. На основі отриманих результатів було побудовано геометричну модель лопаткового вінця із лопатками з відносним положенням щілини по хорді профілю 60%, для якого було проведено серію чисельних розрахунків для визначення оптимального значення імпульсу видуву, що визначається з умови $\alpha \approx 0$. Коефіцієнт α характеризує рівень нерівномірності потоку як відношення:

$$\alpha = \left| \frac{c_0 - c_{K \min}}{c_0} \right|,$$

де: c_0 – абсолютна швидкість ядра основного потоку; $c_{K \min}$ – абсолютна швидкість потоку в ядрі сліду.

На рис. 4, 5 представлено миттєвий розподіл поля швидкості без застосування газодинамічного впливу на параметри течії та із застосуванням газодинамічного впливу на

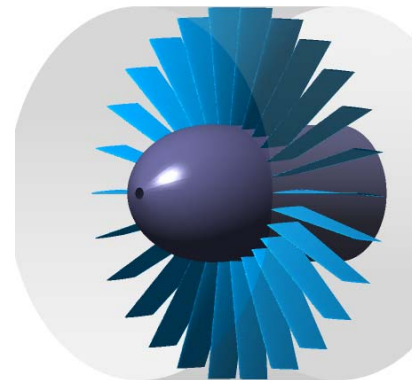


Рис.3. Твердотільна модель ВНА ТРДД

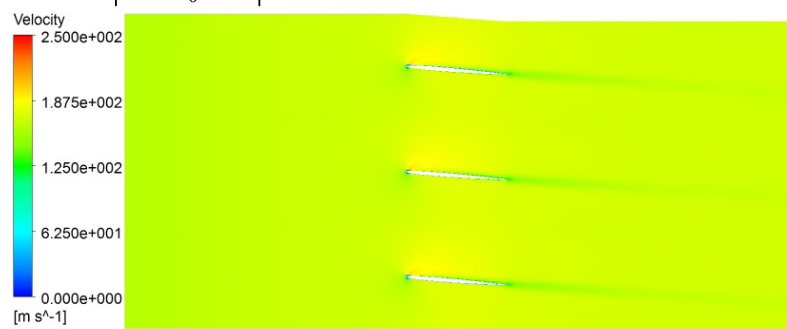


Рис. 4. Миттєвий розподіл поля швидкості без застосування газодинамічного впливу на параметри течії

параметри течії.

За результатами чисельного експерименту була побудована залежність рівня нерівномірності потоку α від коефіцієнта імпульсу видуву c_μ (рис.6).

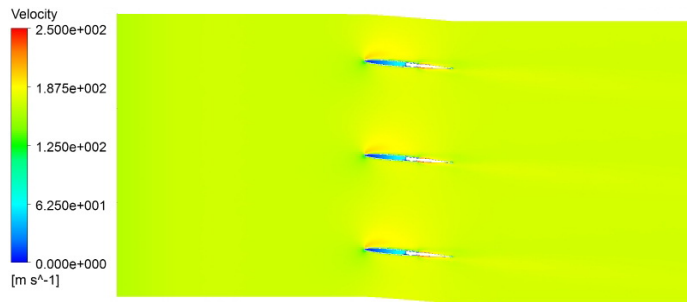


Рис. 5. Миттєвий розподіл поля швидкості із застосуванням газодинамічного впливу на параметри течії при $\bar{b}_{uz}=0.6$, $\bar{h}_{uz}=0.005$

З графіку видно, що для зменшення колової нерівномірності потоку до рівня $\alpha \leq 0.02$ коефіцієнт імпульсу видуву повинен бути в межах $0.0128 \leq c_\mu \leq 0.01495$.

Оптимальне значення коефіцієнта імпульсу видуву, при якому рівень нерівномірності потоку до $\alpha \approx 0$, дорівнює $c_{\mu opt} = 0.0135$.

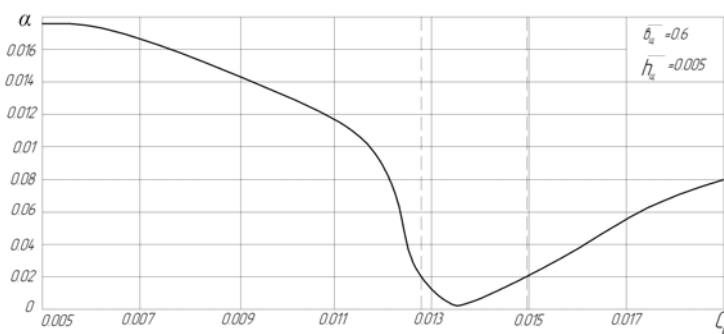


Рис.6. Залежність рівня нерівномірності потоку від коефіцієнта імпульсу видуву потоку

Висновок

Результати чисельного моделювання дозвукової течії у газотурбінному двигуні показали, що рівень колової нерівномірності, обумовленої аеродинамічними слідами за елементами статора, може бути знижено до $\alpha \approx 0$ при інтенсивності газодинамічного управління обіканням, що відповідає значенням коефіцієнта імпульсу видуву $c_\mu = 0.013 - 0.014$.

Список літератури: 1. *Самойлович Г.С.* Нестационарное обтекание и аэроупругие колебания решеток турбомашин / *Г.С. Самойлович.* - М.: "Наука", 1969. - 444с. 2. *Самойлович Г.С.* Возбуждение колебаний лопаток турбомашин / *Г.С. Самойлович.* - М.: Машиностроение, 1975. - 287с. 3. *Филиппов Г.В.* Влияние поперечного градиента давления на параметры турбулентного пограничного слоя / *Г.В. Филиппов, В.Г. Шахов* // ИВУЗ Авиационная техника. - 1969. - №3. - С.28-33 4. *Писаренко Г.С.* Проблемы аэроупругости лопаток турбомашин / *Г.С. Писаренко, Л.Е. Ольштейн* // Проблемы прочности. - 1974. - № 8. - С. 3-8. 5. *Дейч М.Е.* Основы аэродинамики осевых турбомашин / *М.Е. Дейч, Г.С. Самойлович.* - М.: Машгиз, 1959. - 428с. 6. *Кулагина В.А.* Влияние окружной неравномерности направления потока на резонансные колебания лопаток рабочего колеса компрессора / *В.А. Кулагина* // Сб. "Лопаточные машины и струйные аппараты". - М.: Машиностроение, 1971. - № 5. - С.121-128 7. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя / *Г. Шлихтинг.* - М.: Наука, 1974. - 711 с. 8. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа / *Л.Г. Лойцянский.* - М.: Наука, 1970. - 676с. 9. *Кумиров Б.А.* Исследование закромочных явлений в лопатках с выпуском охлаждающего воздуха из выходных кромок или вблизи них / *Б.А. Кумиров* // Труды КАИ. - Казань, 1973. - Вып. 155. - С.33-39 10. *Терещенко Ю.М.* Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров / *Ю.М. Терещенко.* - М.: Машиностроение, 1988. - 188с. 11. *Мугалев В.П.* Экспериментальное

исследование дозвукового пограничного слоя на пластине со сдувом / В.П. Мугалев // ИВУЗ Авиационная техника. – 1959. – № 3. – С. 33-40 **12.** Терещенко Ю.М. О газодинамическом воздействии на структуру потока за элементами статора осевого компрессора ГТД / Ю.М. Терещенко // Журнал «Известия ВУЗ» Авиационная техника. – 1981. – №3. – С.14-17 **13.** Терещенко Ю.М. Аэродинамические характеристики диффузорных решеток с управлением циркуляцией / Ю.М. Терещенко // ИВУЗ Авиационная техника. – 1976. – № 4. – С.22-24

Поступила в редколлегию 15.05.2012.

УДК 621.006.354

В.Г. КУЗНЕЦОВ, доц., канд.техн.наук, ДНУ, Днепропетровск,
Б.А. КОСТЮКОВСКИЙ, канд.техн.наук, нач.отд., Институт общей
энергетики НАН Украины, Киев

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЯГИ ПОЕЗДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В даній статті запропоновано методологічні підходи до визначення потенціалу енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму, запропонована його класифікація, визначені складові частини.

Ключові слова: енергозбереження, система тягового електропостачання, втрати електроенергії, контактна мережа, тягова підстанція.

В данной статье предложены методологические подходы к определению потенциала энергосбережения в системах электроснабжения тяги поездов постоянного тока, предложена его классификация, определены составные части.

Ключевые слова: энергосбережение, система тягового электроснабжения, потери электроэнергии, контактная сеть, тяговая подстанция.

In this paper the authors proposed a methodological approach to the definition of energy saving potential in DC traction power supply systems, offered its classification, defined its parts.

Keywords: energy saving, traction power supply system, energy losses, contact line, traction substation.

Управление развитием и функционированием железнодорожного транспорта Украины в условиях постоянно растущих цен на топливно-энергетические ресурсы требует особого внимания к решению проблемы повышения эффективности использования энергоресурсов и к реализации энергосберегающей политики в отрасли, что обуславливает актуальность научных исследований направленных на её решение.

Первым этапом решения этой проблемы является определение технического потенциала энергосбережения, который может определяться как для отдельного i -го энергосберегающего мероприятия на k , $k \in K$, элементе (объекте) рассматриваемой производственно-хозяйственной системы, так и для различных множеств таких мероприятий, i , $i \in I$.

Это потенциал может рассчитываться как в абсолютном выражении (1), так и в относительных единицах (2).

$$PES_{KI}^A = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (K_j \cdot (W_{ki}^B - W_{ki}^P) \cdot T_{ki}) \quad (1)$$