

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

**ІВАНЧЕНКО ОЛЕНА МИКОЛАЇВНА**



УДК 621.438:532.5

**РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ  
НА ЛОПАТКАХ ГАЗОВИХ ТУРБІН З ВИКОРИСТАННЯМ  
МОДИФІКОВАНИХ АЛГЕБРАЇЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТІ**

Спеціальність 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків–2012

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі турбінобудування Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Капінос Василь Максимович**

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Маляренко Віталій Андрійович,**  
Харківська національна академія міського господарства,  
завідувач кафедри електропостачання міст

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
**Голощанов Володимир Миколайович,**  
Інститут проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного НАН України  
старший науковий співробітник  
відділу моделювання та ідентифікації теплових процесів

Захист відбудеться «25» жовтня 2012 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.11 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21..

Автореферат розісланий «\_\_\_» вересня 2012 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Юдін Ю.О.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У даний час одним із основних завдань при проектуванні високотемпературних ГТУ є створення ефективних систем охолодження лопаток газових турбін, що забезпечують їх допустимий температурний і термонапружений стан.

Точність розрахунку температурного поля лопатки газової турбіни багато в чому визначається точністю завдання граничних умов тепловіддачі, зокрема, локальних коефіцієнтів тепловіддачі (КТВ) вздовж обводу профілю лопатки. Останнім часом для знаходження значень КТВ в основному використовується експериментальний підхід, який має недоліки, пов'язані з високою вартістю проведення експериментів, тому не вдається охопити увесь спектр проєктованих конфігурацій решіток і режимів роботи. Заміна фізичного експерименту обчислювальним дозволить прискорити і здешевити дослідження. Ключовим моментом в цій проблемі являється підтвердження точності математичного моделювання порівнянням з експериментальними даними.

Застосування існуючих методів розрахунку локальних КТВ вздовж обводу профілю лопатки не дозволяє в повній мірі визначити істинний розподіл інтенсивності теплообміну, оскільки результати, що отримують з їх використанням, мають значний розкид. Однією з причин є складна структура течії по обводу профілю.

Розробка методики розрахунку локальних КТВ на лопатці із застосуванням досить універсальних математичних моделей турбулентності з точки зору їх можливості адекватного опису пристінних гідродинамічних пограничних шарів із складними законами розподілу швидкості в зовнішньому потоці і здатних враховувати вплив ступеню турбулентності зовнішнього потоку є актуальним науково-технічним завданням та визначило напрям досліджень дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі турбінобудування НТУ "ХПИ" у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України : "Фундаментальні теоретичні дослідження алгебраїчних моделей турбулентності і рішення проблем гідродинаміки і теплообміну в парових і газових турбінах" по науковому напрямку 3. Енергетика і природні ресурси 3.1. Енергетика і енергозбереження (ДР. №0100U001661, 2000-2002), "Теоретичні і фундаментальні дослідження в області гідродинаміки і теплообміну в парових і газових турбінах" по науковому напрямку 7. Енергетика і енергозбереження (ДР № 0103U001502, 2003-2005), в яких здобувач була виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** Мета дослідження – удосконалення методики розрахунків локального теплообміну на лопатці газової турбіни за рахунок використання модифікованих і нових алгебраїчних моделей турбулентності, які враховують наявність подовжнього градієнта тиску і впливу ступеня турбулентності зовнішнього потоку.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

- розробити моделі турбулентності, які б враховували залежність константи турбулентності від градієнта тиску і інших факторів, а також нелінійний зв'язок між довжиною шляху зміщення і поперечною координатою поблизу стінки;
- розробити і перевірити можливість використання альтернативних алгебраїчних моделей турбулентності на основі універсальних профілів швидкості, у тому числі і для умов підвищеного ступеня турбулентності зовнішнього потоку;
- розробити методику розрахунку інтенсивності теплообміну, що враховує складну структуру потоку по обводу профілю лопатки;
- провести апробацію запропонованої методики з використанням нових моделей турбулентності для розрахунку гідродинаміки і локального теплообміну по обводу профілю лопатки газової турбіни;
- провести порівняння розрахункових даних для найбільш поширених алгебраїчних моделей турбулентності нульового порядку і гібридної моделі Джонсона-Кінга з канонічними експериментальними даними Стенфордської конференції. На підставі результатів порівняння розрахункових і експериментальних даних дати оцінку ефективності аналізованих моделей турбулентності.

*Об'єктом дослідження є процес локального теплообміну на лопатці в зоні турбулентного пограничного шару, а саме моделювання властивостей гідродинамічного пограничного шару з урахуванням явищ, що спостерігаються в ньому.*

*Предмет дослідження - пристінні гідродинамічні пограничні шари із складними законами розподілу швидкості зовнішнього потоку і з наявністю турбулентності в зовнішньому потоці.*

*Методи дослідження.* Теоретичні положення дослідження ґрунтуються на теоріях гідродинаміки і теплообміну. Для отримання характеристик гідродинамічного пограничного шару використовувались методи обчислювальної гідродинаміки. Розрахункові дослідження виконані із застосуванням кінцево-різницевого методу Плетчера та Дюфорта-Франкаля.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше розроблена математична модель течії та теплообміну вздовж профілю лопатки в зоні турбулентного режиму, яка враховує наявність градієнтів тиску в течії та підвищену ступінь турбулентності зовнішнього потоку. Доведено можливість її використання шляхом порівняння результатів проведених розрахунків теплообміну з експериментальними даними;
- вперше запропонована і апробована можливість використання модифікованих моделей турбулентності для розрахунку течії і локального теплообміну по обводу профілю лопатки газової турбіни;
- вперше проведені детальні порівняльні розрахунки турбулентного пограничного шару з використанням найбільш поширених алгебраїчних

моделей турбулентності Себесі-Сміта і Болдвіна-Ломмакса, а також гібридної моделі турбулентності Джонсона-Кінга;

– запропоновано новий закон стінки для опису градієнтних течій, що дозволяє підвищити точність визначенні коефіцієнту поверхневого тертя методом Клаузера;

– розроблена алгебраїчна модель турбулентності на основі двох параметричного профілю швидкості Томпсона з урахуванням змінності «константи» турбулентності та безпосереднього диференціювання профілю для розрахунку похідної від швидкості по поперечній координаті;

– побудована залежність, яка дозволяє визначити ступінь турбулентності зовнішнього потоку, загальмованого на вхідній кромці профілю лопатки, в функції трьох аргументів: радіусу кромки, ступені турбулентності потоку, який набігає та відстані між точкою, де проводився вимір та кромкою профілю;

– розроблена алгебраїчна модель турбулентності на основі трьох параметричного профілю швидкості Коулса, що враховує ступінь турбулентності зовнішнього потоку.

**Практичне значення отриманих результатів** для галузі турбінобудування полягає у розробці методів для розрахунку теплового і термонапруженого стану лопаток газових турбін та проектування ефективних систем охолодження лопаток, що підвищить економічність і надійність роботи ГТУ.

Результати дисертаційної роботи планується використовувати ВАТ «Турбоатом» при проектуванні нових та модифікації існуючих газових турбін (акт впровадження від 18 квітня 2012 року).

Основні результати досліджень використовуються в навчальному процесі кафедри турбінобудування НТУ "ХПИ" (акт впровадження від 10 січня 2012 р.) в курсах лекцій «Проблеми теплообміну в паротурбінних та газотурбінних установках», «Теорія пограничного шару» для спеціалістів та магістрів, які навчаються за напрямком «Теплоенергетика», та в курсі «Газові турбіни та газотурбінні установки» для бакалаврів, які навчаються за напрямком «Енергомашинобудування».

**Особистий внесок здобувача.** Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: аналіз існуючих методів розрахунку КТВ вздовж обводу профілю лопатки; порівняльний аналіз алгебраїчних моделей турбулентності і моделі турбулентності Джонсона-Кінга, алгоритм чисельного розрахунку систем рівнянь турбулентного пограничного шару і проведені розрахунки інтегральних характеристик пограничного шару для різних типів течій; апробований запропонований узагальнений закон стінки для течій з градієнтом тиску; розробка узагальнених моделей турбулентності, що враховують наявність градієнта тиску в потоці і ступінь турбулентності зовнішнього потоку, і проведена перевірка їх ефективності; розробка алгоритму і проведення порівняння розрахункових і експериментальних даних при використанні

залежності для визначення ступеня турбулентності набігаючого потоку перед кромками турбінних профілів; апробація методу розрахунку локальних КТВ по обводу профілю лопатки з використанням модифікованої моделі турбулентності, що враховує градієнт тиску в потоці, і алгебраїчної моделі турбулентності, що враховує ступінь турбулентності зовнішнього потоку.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на: XIV та XVIII Міжнародній науково-практичній конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (м. Харків, 2006 р., 2010 р.); II, IV, V, VI науково-технічних конференціях «Проблеми енергозбереження України і шляхи їх вирішення» (м. Харків, 2006 р., 2008 р., 2009 р., 2010 р.); IV Міжнародній науково-технічній конференції студентів (м. Донецьк, 2005 р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 10 наукових публікаціях, з них: 1 монографія та 7 статей у наукових фахових виданнях України.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку літератури. Загальний обсяг дисертації становить 180 сторінок; з них 28 рисунків по тексту; 37 рисунків на 35 окремих сторінках; 7 таблиць по тексту; список використаних джерел з 77 найменувань на 8 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

**Перший розділ** присвячено аналізу сучасного стану проблеми чисельного розрахунку локального теплообміну по обводу профілю лопатки газової турбіни і аналізу існуючих алгебраїчних моделей турбулентності. Розглянуті існуючі методи розрахунку локальних КТВ вздовж обводу профілю, проаналізована достовірність отримуваних при їх використанні результатів. Проведений критичний аналіз найбільш поширених алгебраїчних моделей турбулентності (Себесі-Смітта, Болдвіна-Ломмакса та ін.) і "гібридної" моделі турбулентності Джонсона-Кінга з точки зору можливості їх використання для опису різного типу турбулентних течій. В результаті проведеного аналізу відмічена необхідність додаткового удосконалення методів розрахунку локальних КТВ; визначені напрями модифікації і розробки нових алгебраїчних моделей турбулентності, що дозволяють врахувати складну структуру течії по обводу профілю лопатки, зокрема, наявність подовжнього градієнта тиску і підвищеного ступеня турбулентності зовнішнього потоку; відмічені можливості їх використання для опису пристінних гідродинамічних пограничних шарів і подальшого розрахунку локальних КТВ по обводу профілю лопатки.

У **другому розділі** приведений опис запропонованої модифікації моделі турбулентності Себесі-Смітта, що дозволяє врахувати наявність подовжнього

градієнта тиску в потоці. Сформульовані основні залежності модифікованої моделі і пояснена необхідність їх використання.

Для врахування нелінійності довжини шляху зміщення від координати, нормальної до площини стінки, а також змінності константи турбулентності залежно від градієнта тиску запропоновано використати для розрахунку довжини шляху зміщення в першому шарі

$$l^* = ky^* \left[ th \left( \frac{0,012 y^*}{k} \right)^{0,5} \right]^2 \quad (1)$$

при змінному  $k$ , яке визначається залежністю

$$k_{эф} = k \sqrt{\tau/\tau_w}, \quad (2)$$

$$\text{де } \frac{\tau}{\tau_w} = 1 + p^+ y^+ + \frac{1}{2} a^+ \left[ c_1 + y^+ \left( c_2 (\ln y^+)^2 + c_3 \ln y^+ + c_4 \right) \right]; \quad p^+ = \frac{\nu}{\rho \nu_*^3} \frac{dP}{dx};$$

$$a^+ = \frac{\nu}{\rho \nu_*^3} \frac{d\tau_w}{dx}; \quad y^+ = \frac{y \nu_*}{\nu}; \quad c_1 = -777,0; \quad c_2 = 5,706; \quad c_3 = 14,62; \quad c_4 = 15,08.$$

Сформульований узагальнений закон стінки для градієнтних течій, що дозволяє зберегти лінійну залежність між безрозмірною швидкістю і числом Рейнольдса. Отримана залежність

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{k} \ln \frac{y \nu_*}{\nu} + B, \quad \bar{\varphi} = \frac{u - (1 - \gamma) u_l}{\nu_* \gamma} \quad (3)$$

і доведена можливість поширення лінійного закону стінки на градієнтні течії шляхом порівняння з дослідними даними. Відмічено, що використання цієї залежності дозволить підвищити точність визначення коефіцієнта поверхневого тертя методом Клаузера.

Сформульовані основні залежності нової моделі турбулентності на основі універсального профілю швидкості Томпсона, що дозволяє врахувати подовжній градієнт тиску в потоці і підвищити точність розрахунку за рахунок аналітичного визначення похідної швидкості по поперечній координаті. Нова модель двошарова, у внутрішньому шарі використовуються залежності (1) і (2), а в зовнішньому шарі турбулентна в'язкість описується співвідношенням

$$\tau_T = 0,0168 \rho u_l \delta^* \gamma_k \frac{du}{dy}, \quad (4)$$

у якому похідна швидкості обчислюється по залежності

$$\frac{du}{dy} = 0,5u_l \left\{ \left[ -\sin\left(\frac{10}{9}\pi\right)\left(\frac{y}{\delta} - 0,05\right)\frac{10}{9}\frac{\pi}{\delta} \right] \left( \frac{\omega}{k} \ln \text{Re}_y + B\omega \right) + \right. \\ \left. + \left( 1 + \cos\frac{10}{9}\pi\left(\frac{y}{\delta} - 0,05\right)\frac{\omega}{k}\frac{1}{y} \right) + \sin\left(\frac{10}{9}\pi\right)\left(\frac{y}{\delta} - 0,05\right)\frac{10}{9}\frac{\pi}{\delta} \right\}. \quad (5)$$

Описана нова модель турбулентності на основі трьохпараметричного профілю швидкості Коулса, що дозволяє врахувати ступінь турбулентності набігаючого потоку. Її структура аналогічна приведеній вище моделі, але в зовнішньому шарі для визначення похідної швидкості по поперечній координаті використовується співвідношення

$$\frac{du}{dy} = \frac{\omega u_l}{k} \left[ \frac{1}{y} + \frac{\pi k}{2\delta} (1 - 5Tu) \sin\left(\pi \frac{y}{\delta}\right) \left( \frac{1}{\omega} - \frac{1}{k} \ln \frac{\delta \omega u_l}{\nu} - B \right) \right]. \quad (6)$$

Товщина пограничного шару  $\delta$  визначається по залежності

$$\delta = 2\delta^* \left/ \left[ 2 \frac{\omega}{k} + (1 - 5Tu) \left( 1 - \frac{\omega}{k} \ln \frac{\delta \omega u_l}{\nu} - B\omega \right) \right] \right. \quad (7)$$

Для точнішого визначення  $Tu$  виведена залежність, що дозволяє визначити істинне значення  $Tu$  перед вхідною кромкою лопатки залежно від радіусу кромки лопатки  $r_0$ , ступеня турбулентності набігаючого потоку  $Tu_0$  і відстані від перерізу, де вимірювалося  $Tu_0$  до кромки лопатки

$$Tu = \left[ 4,83 + \frac{10 S/r_0 - 6,67}{0,751 - 10,32 S/r_0} \right] Tu_0. \quad (8)$$

Її використання перевірене порівнянням з експериментальними даними.

У **третьому розділі** приведена методика чисельного розрахунку систем рівнянь турбулентного пограничного шару при використанні модифікованих і нових моделей турбулентності.

Система рівнянь включає рівняння руху, нерозривності і енергії, а також граничні умови. Рівняння руху враховує ефективну турбулентну в'язкість, виражену через прандтлевське поняття довжини шляху змішення і зв'язок між



градієнтом тиску в зовнішньому потоці зі швидкістю на зовнішній межі пограничного шару

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = U_l \frac{\partial U_l}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y}, \quad (9)$$

$$\text{де } \tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} + \rho \nu_{\tau} \frac{\partial u}{\partial y} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} + \rho \ell^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \frac{\partial u}{\partial y}.$$

Рівняння енергії отримане з урахуванням аналогії числа Рейнольда

$$\rho u \frac{\partial i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{\mu}{\text{Pr}} \frac{\partial i}{\partial y} + \frac{\rho \ell^2}{\text{Pr}} \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \frac{\partial i}{\partial y} + \mu \left( 1 - \frac{1}{\text{Pr}} \right) u \frac{\partial i}{\partial y} \right]. \quad (10)$$

Граничними умовами для вирішення системи рівнянь були:

– на поверхні лопатки враховувалися умови "прилипання"

$$u = 0, \quad v = 0, \quad I = C_p T_w,$$

де  $T_w$  – температура поверхні лопатки;

□ – на зовнішній межі пограничного шару враховувалися умови зімкнення із зовнішнім потоком:

$$u = U_l, \quad i = i_l = C_p T_l + \frac{U_l^2}{2},$$

де  $T_l$  – температура потоку, що омиває поверхню.

Для вирішення системи диференціальних рівнянь застосовувався кінцево-різницевий метод Плетчера. Кінцево-різницеве представлення рівнянь отримане по методу Дюфорта-Франкаля.

Усі запропоновані моделі турбулентності належать до одного виду (двошарові моделі з емпіричною залежністю для турбулентної в'язкості). Для розрахунку параметрів течії і теплообміну розроблений алгоритм, що включає декілька кроків : 1) визначення початкових даних для розрахунку: розподіл швидкості  $u$ , товщина пограничного шару  $\delta$ , значення ефективної в'язкості на стінці  $\tau_w$  і температури стінки  $T_w$ ; 2) побудова нерівномірної сітки зі збільшенням кроку  $y$  напрямі  $y$  і значенням нормованої відстані  $y^+ = \frac{y U_*}{\nu}$

близько 1; 3) визначення значень турбулентної в'язкості в цьому перерізі; 4) розрахунок параметрів течії в наступному перерізі  $x$  з використанням отриманих значень в'язкості і їх уточнення; 5) перехід до наступного перерізу.

Приведений розроблений алгоритм розрахунку течії з використанням моделі турбулентності Джонсона-Кинга, який включає: 1) розрахунок рівнянь для рівноважної течії, що дозволяють визначити турбулентну в'язкість  $\nu_{\tau,eq}$

$$v_{T,eq} = v_{T0,eq} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{v_{Ti,eq}}{v_{T0,eq}}\right) \right], \quad (11)$$

где  $v_{Ti,eq} = F^2 k y (\overline{u'v'_{m,eq}})^{1/2}$ ,  $v_{T0,eq} = 0,0168 u_e \delta^* \gamma$ ,  $(-\overline{u'v'_{m,eq}})^{1/2} = L_m \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_m$ ;

2) розрахунок звичайного диференціального рівняння і визначення максимального значення рейнольдсового напруження зрушення  $-\overline{u'v'_m}$

$$\underbrace{\frac{d(\overline{u'v'_m})^{-1/2}}{dx}}_{\text{конвекция}} = \frac{a_1}{2u_m L_m} \left[ \underbrace{\left( 1 - \frac{(\overline{u'v'_m})^{-1/2}}{(\overline{u'v'_{m,eq}})^{-1/2}} \right)}_{\text{небаланс произведения и диссипации}} + \underbrace{\frac{C_{diff} L_m}{a_1 \delta \left( 0,7 - \left( \frac{y}{\delta} \right)_m \right)} \left( 1 - \left( \frac{v_{T0}}{v_{T0,eq}} \right)^{1/2} \right)}_{\text{вклад диффузии}} \right]; \quad (12)$$

3) розрахунок рівнянь для невірноваженої течії, що дозволяє визначити турбулентну в'язкість при невірноваженій течії  $v_T$ .

$$v_T = v_{T0} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{v_{Ti}}{v_{T0}}\right) \right], \quad (13)$$

**Четвертий розділ** містить порівняльний аналіз існуючих і запропонованих алгебраїчних моделей турбулентності. Аналіз проведений на підставі розрахунку інтегральних характеристик турбулентного пограничного шару: товщини витіснення, товщини втрати імпульсу, формпараметра і коефіцієнта тертя для різних течій, що відрізняються розподілом градієнта тиску і інших параметрів. Ефективність моделей оцінена на підставі порівняння з експериментальними даними Стенфордської конференції. В якості тестових вибрані течії: з негативним градієнтом тиску (1300<sup>1</sup>), при постійному тиску (3000), з позитивним градієнтом тиску (3300, 4800, 4500, 1200), рівноважне при постійному тиску (3000).

Аналіз моделей турбулентності Себесі-Смітта, Болдвіна-Ломмакса і Джонсона-Кінга показав, що краще узгодження інтегральних характеристик з даними Стенфордської конференції отримане при використанні моделі Джонсона-Кінга, відхилення розрахункових значень в розрахунках при використанні двох інших моделей приблизно однакові (рис. 1, 2).

Показано, що модифікація моделі турбулентності Себесі-Смітта (введення нової формули розрахунку константи турбулентності для врахування її зміни від градієнта тиску) дозволяє значно поліпшити точність розрахунку інтегральних характеристик в порівнянні з початковою моделлю (рис. 3) і

<sup>1</sup> Тут і далі номер по ідентифікації Стенфордської конференції.

наблизити її до точності, що дається моделлю турбулентності Джонсона-Кінга при значно простішому алгоритмі обчислень.

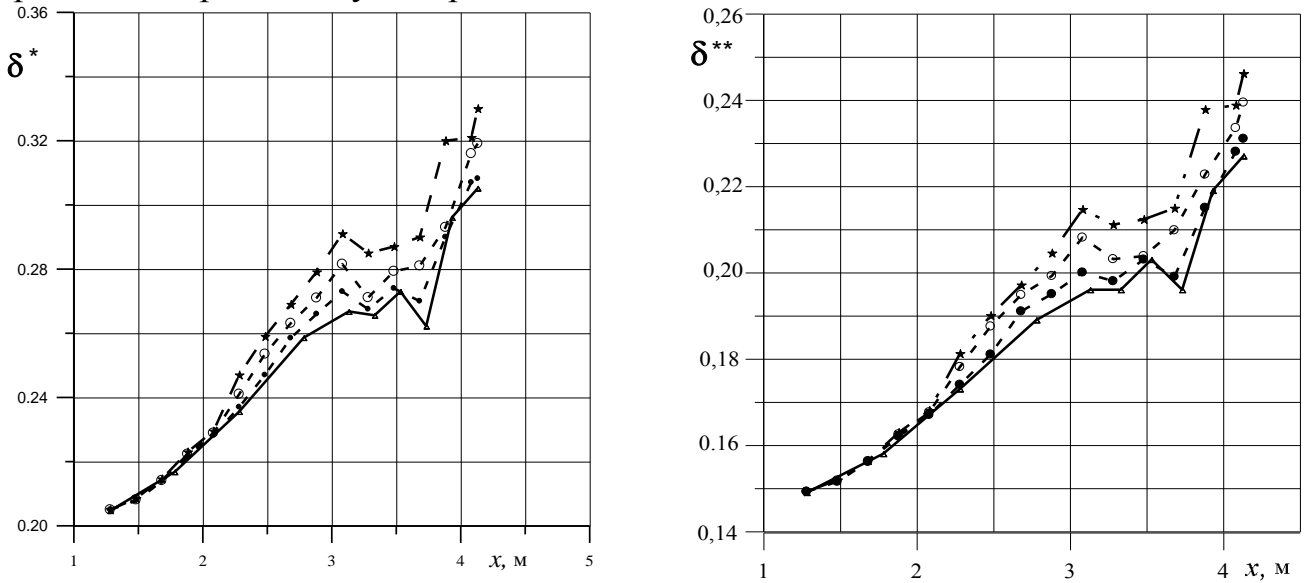


Рис. 1 Порівняння трьох моделей турбулентності: Себесі-Сміта, Болдвіна-Ломакса и Джонсона-Кінга. Течія 1300:

- △— — дані Стенфордської конференції;
- — дані розрахунків по моделі турбулентності Себесі-Сміта;
- — дані розрахунків по моделі турбулентності Джонсона-Кінга;
- ★--- — дані розрахунків по моделі турбулентності Болдвіна-Ломакса

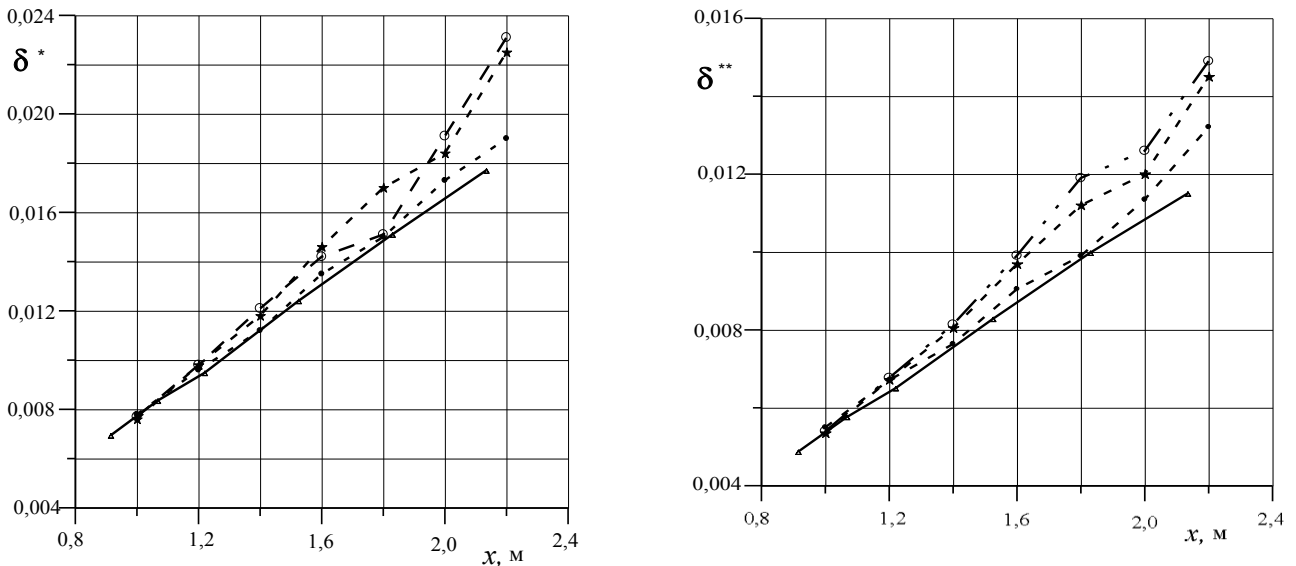


Рис. 2 Порівняння трьох моделей турбулентності: Себесі-Сміта, Болдвіна-Ломакса и Джонсона-Кінга. Течія 3300:

- △— — дані Стенфордської конференції;
- — дані розрахунків по моделі турбулентності Себесі-Сміта;
- — дані розрахунків по моделі турбулентності Джонсона-Кінга;
- ★--- — дані розрахунків по моделі турбулентності Болдвіна-Ломакса

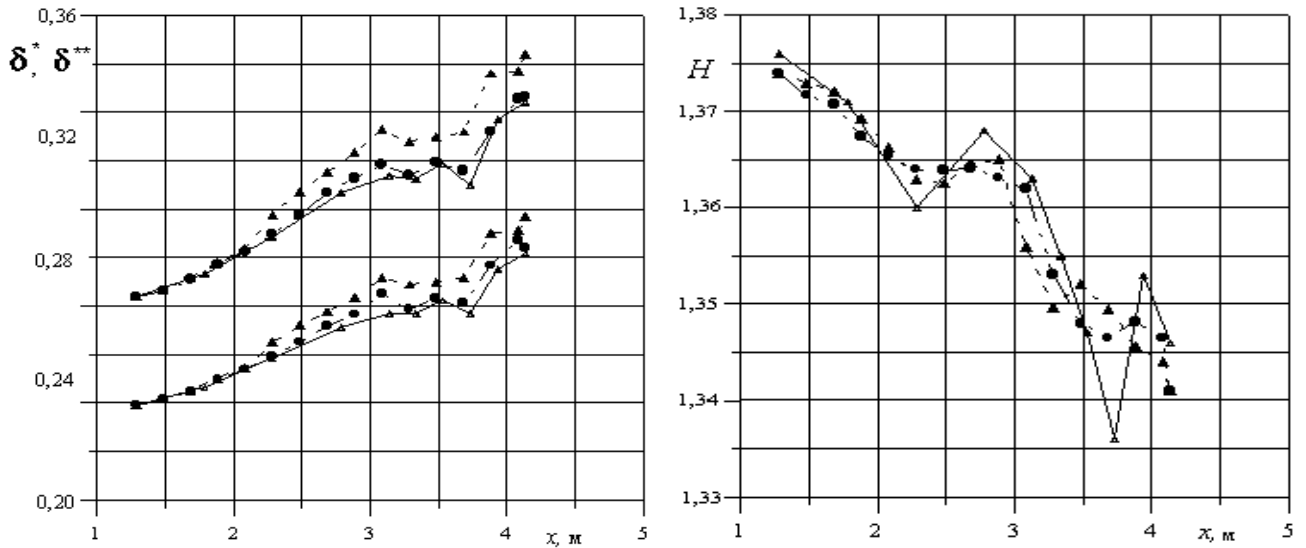


Рис. 3 Інтегральні характеристики течії 1300.

—●— — модифікована модель турбулентності Себесі–Сміта с урахуванням змінності «константи» турбулентності;  
 ---○--- — модель Себесі–Сміта;  
 ————— — дані Стенфордської конференції.

Порівняльний аналіз показав, що моделі турбулентності, отримані при використанні універсальних профілів швидкості Томпсона і Коулса, дозволяють збільшити точність розрахунку інтегральних характеристик в порівнянні з існуючими моделями (рис. 4).

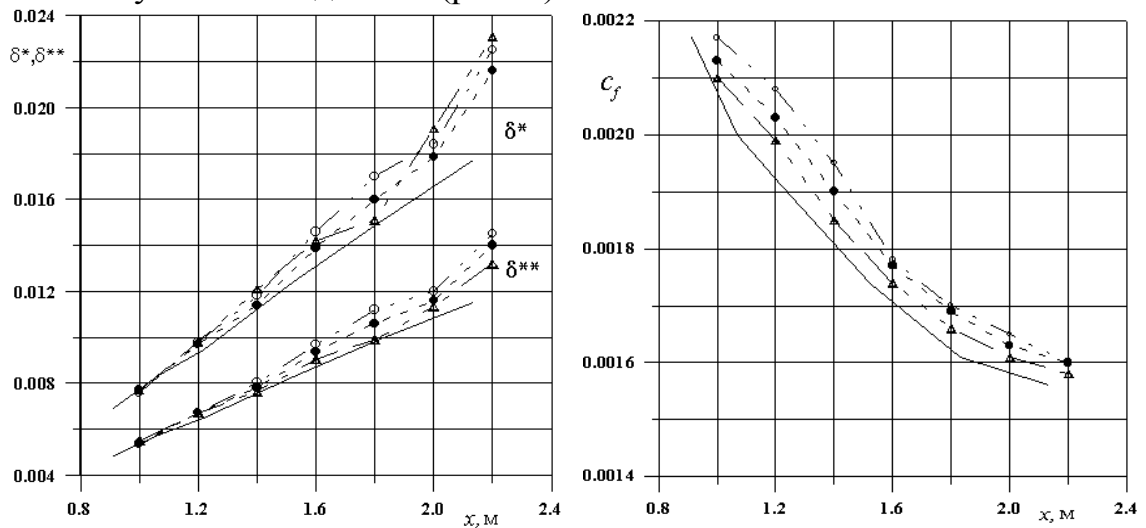


Рис. 4 Інтегральні характеристики течії 3300

---△--- — розрахунки з використанням моделі Джонсона-Кінга;  
 ---●--- — розрахунки з використанням профіля Томпсона;  
 ---○--- — розрахунки з використанням моделі Себесі-Сміта;  
 ————— — дані Стенфордської конференції.

У п'ятому розділі наведені результати розрахунків теплообміну по обводу профілю лопатки ТС-1А в зоні турбулентного режиму течії з використанням розробленої математичної моделі. Для перевірки точності розрахунків проведено порівняння з дослідними даними, що включають якнайповніше дослідження теплообміну на лопатці при різних ступенях турбулентності зовнішнього потоку. Експеримент був проведений на кафедрі турбінобудування НТУ «ХП». Розрахунки виконані як з використанням модифікованої алгебраїчної моделі турбулентності Себесі-Сміта (рис. 5), так і моделі на основі трьохпараметричного профілю швидкості Коулса, яка враховує ступінь турбулентності набігаючого потоку (рис. 6). Також виконані розрахунки КТВ вздовж профілю направляючої лопатки газової турбіни ГТЕ-115 та проведено порівняння з результатами, які отримані з використанням найбільш поширених методів (рис. 7). Приведені результати порівнянь з експериментальними даними дозволяють зробити висновок, що ці моделі можуть використовуватися для розрахунку локальних коефіцієнтів тепловіддачі на профілі лопатки і дозволяють отримати результати з прийнятною для інженерних розрахунків точністю.

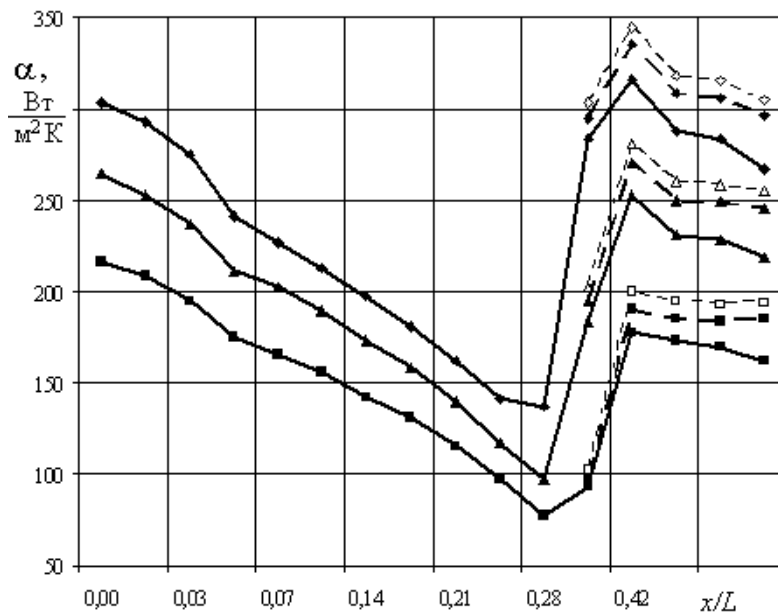


Рис. 5 Розподіл коефіцієнтів тепловіддачі на випуклій стороні профілю лопатки ТС-1А

Експериментальні дані:

—■— —  $Re=1,68 \cdot 10^5$ ; —▲— —  $Re=2,5 \cdot 10^5$ ; —◆— —  $Re=3,32 \cdot 10^5$ ;

Результати розрахунків:

з використанням модифікованої моделі турбулентності Себесі-Смітта:

- ■ - -  $Re=1,68 \cdot 10^5$ ; - ▲ - -  $Re=2,5 \cdot 10^5$ ; - ◆ - -  $Re=3,32 \cdot 10^5$ ;

з використанням стандартної моделі турбулентності Себесі-Смітта:

- □ - -  $Re=1,68 \cdot 10^5$ ; - △ - -  $Re=2,5 \cdot 10^5$ ; - ◇ - -  $Re=3,32 \cdot 10^5$ ;

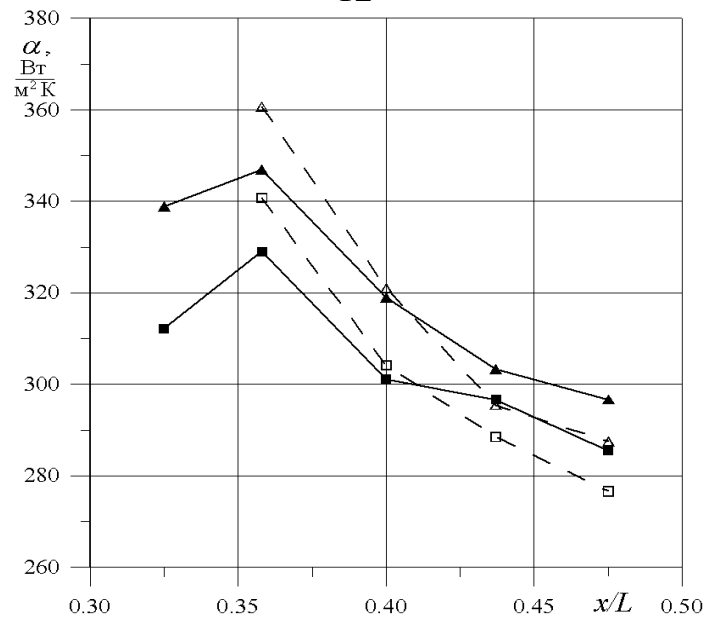


Рис. 6 Розподіл коефіцієнтів тепловіддачі на випуклій стороні профілю лопатки ТС-1А

Експериментальні дані: —■— —  $Tu_0 = 7,2\%$ ; —▲— —  $Tu_0 = 9,6\%$ ;  
 Результати розрахунків з використанням моделі турбулентності, яка враховує  
 ступінь турбулентності набігаючого потоку:  
 - -□- -  $Tu_0 = 7,2\%$ ; - -△- -  $Tu_0 = 9,6\%$ .

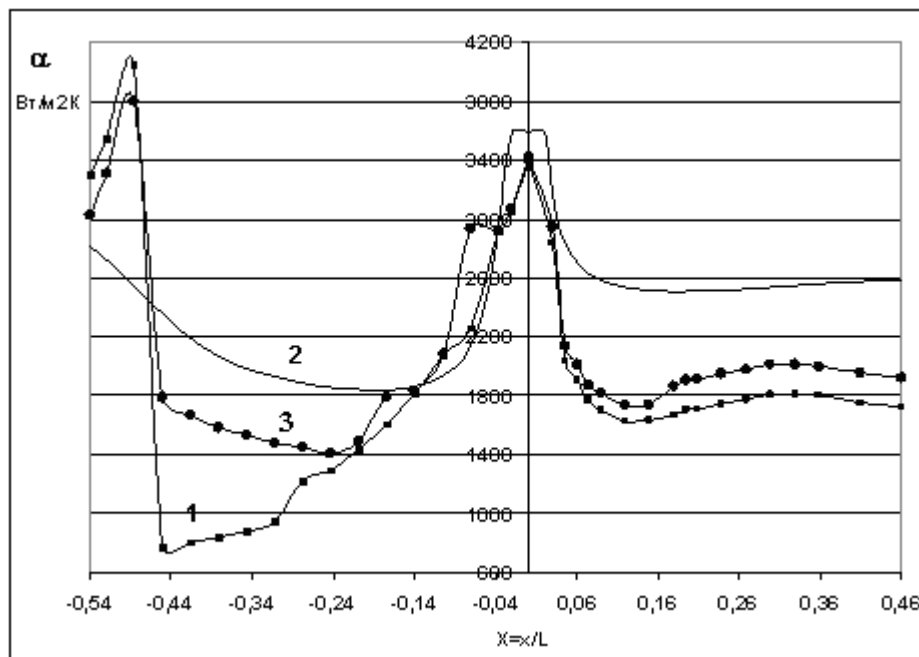


Рис. 7 Тепловіддача на профілі направляючої лопатки першого ступеня ГТУ ГТЕ-115:

- 1 – інтегральний метод розрахунку;
- 2 – метод трьох ділянок;
- 3 – метод розрахунку з використанням моделі турбулентності, яка враховує ступінь турбулентності зовнішнього потоку

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу удосконалення методики розрахунку теплообміну на лопатці газової турбіни за рахунок використання моделей турбулентності, що враховують особливості течії уздовж обводу профілю лопатки.

Основні висновки дисертаційної роботи:

1. Розроблен алгоритм розрахунку параметрів течії і теплообміну по обводу профілю лопатки газової турбіни в зоні турбулентного режиму течії. На підставі проведених порівняльних розрахунків і аналізу структури течії для моделі були вибрані запропонована модифікована модель турбулентності Себесі-Смітта, що дозволяє врахувати подовжній градієнт тиску, що має місце при обтіканні лопатки, і модель турбулентності на основі трьохпараметричного профілю швидкості Коулса, що дозволяє врахувати міру турбулентності зовнішнього потоку.

2. Отриманий узагальнений закон стінки для опису градієнтних течій, що дозволяють зберегти лінійну залежність між безрозмірною швидкістю і числом Рейнольдса для градієнтних течій. Узагальнений закон стінки дозволяє помітно підвищити точність визначення коефіцієнта поверхневого тертя методом Клаузера за рахунок збільшення числа використовуваних для порівняння дослідних точок.

3. Проведені детальні порівняльні розрахунки турбулентних пограничних шарів з використанням найбільш поширених алгебраїчних моделей турбулентності Себесі-Сміта і Болдвіна-Ломакса і "гібридної" моделі Джонсона-Кінга. В цілому відхилення розрахункових значень інтегральних характеристик по моделях СС і БЛ від дослідних приблизно однакові. Істотно точніші результати розрахунку турбулентних течій в порівнянні з моделями СС і БЛ дають обчислення по моделі ДК.

4. Дано математичне формулювання для опису прандтлевської довжини шляху змішення і демпфуючого множника, яка виражає нелінійність залежності довжини шляху змішення від координати, нормальної до площини стінки, а також змінність "константи" турбулентності. Використання модифікованої алгебраїчної моделі турбулентності дозволило по точності розрахунку пограничного шару наблизитися до моделі Джонсона-Кінга. Це дозволяє зробити висновок про доцільність введення в розрахунки турбулентних пограничних шарів змінного  $k$ , залежного від градієнта тиску і градієнта напруги тертя.

5. Запропоновані моделі турбулентності на основі профілів швидкості Томпсона і Коулса. Новизна цих моделей полягає в тому, що в другому шарі двошарової моделі турбулентності розрахунок турбулентної в'язкості в дифузійному членові рівняння руху розраховується із застосуванням безпосереднього (алгебраїчного) диференціювання профілів Томпсона і Коулса, не прибігаючи до кінцево-різницевого представлення похідної швидкості по поперечній координаті. Аналітично також визначається товщина витіснення,

яка входить у формулу Клаузера, що визначає напругу тертя (чи турбулентну в'язкість) в зовнішній течії. .

6. Отримана дослідна залежність, що визначає ступінь турбулентності потоку, загальмованого на вхідній кромці лопатки, у функції трьох аргументів : радіусу кромки, ступеня турбулентності набігаючого потоку, відстані від перерізу, де вимірюється ступінь турбулентності набігаючого потоку, до вхідної кромки. Встановлено, що розрахункові і дослідні значення ступеня турбулентності загальмованого потоку узгоджуються між собою цілком задовільно в усьому дослідженому інтервалі зміни ступеня турбулентності набігаючого потоку (від 0,5% до 14%).

7. На дослідних даних Еванса побудована алгебраїчна модель турбулентності, що враховує ступінь турбулентності зовнішнього потоку. Застосовність і точність запропонованої алгебраїчної моделі турбулентності для різного ступеня турбулентності зовнішнього потоку перевірена шляхом порівняння чотирьох різних розподілів інтегральних параметрів пограничного шару –  $\delta^*$ ,  $\delta^{**}$ ,  $H$ ,  $c_f$  – з двома серіями дослідів Арнала при ступенях турбулентності 0,6% і 0,4%. У обох випадках отриманий хороший збіг розрахункових і досвідчених розподілів інтегральних характеристик.

8. Проведені розрахунки течії і локального теплообміну по обводу профілю лопатки ТС-1А в зоні турбулентного режиму течії з використанням розроблених математичних моделей. Для перевірки точності розрахунків проведено порівняння з дослідними даними, що включають якнайповніше дослідження теплообміну на лопатці при різних ступенях турбулентності зовнішнього потоку. Проведено порівняння локальних коефіцієнтів тепловіддачі на ділянці профілю з турбулентним режимом течії. Приведені на мал. 5 і 6 результати порівнянь з експериментальними даними дозволяють зробити висновок, що ці моделі можуть використовуватися для розрахунку локальних коефіцієнтів тепловіддачі на профілі лопатки і дозволяють отримати результати з прийнятною для інженерних розрахунків точністю.

Результати роботи впроваджені на ВАТ «Турбоатом» та використовуються в навчальному процесі на кафедрі турбінобудування НТУ «ХПІ»

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Е.Н. Иванченко. Алгебраические модели турбулентности (Монография) / В.М. Капинос, Е.Н. Иванченко // Харьков: НТУ «ХПИ», 2008 – 153 с.

*Здобувачем наведені порівняльний аналіз існуючих моделей турбулентності, основні рівняння модифікованих та нових моделей турбулентності та результати розрахунків інтегральних характеристик приграничного шару з їх використанням.*



2. Е.Н. Иванченко. Обобщенный закон стенки. / В.М. Капинос, Е.Н. Иванченко // Проблемы машиностроения. – Харьков, ИМаш им. А.М. Подгорного, 1998. – Т.1., – № 3 – 4, – С. 47 – 51.

*Здобувач виконав порівняльні розрахунки розподілення швидкості у турбулентному пограничному шарі з використанням лінійного та узагальненого закону стінки.*

3. Е.Н. Иванченко. Сравнение алгебраических моделей турбулентности / В.М. Капинос, Е.Н. Иванченко // Интегрированные технологии та энергосбережения. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2000. – №3. – С. 78–84.

*Здобувач виконав порівняльні розрахунки інтегральних характеристик турбулентного пограничного шару, які отримані з використанням алгебраїчних моделей турбулентності Себеси-Смітта, Болдвіна-Ломмакса та «гібридної» моделі Джонсона-Кінга.*

4. Е.Н. Иванченко. Изменение степени турбулентности в заторможенном потоке перед кромками турбинных профилей / В.М. Капинос, Е.Н. Иванченко // Проблемы машиностроения. – Харьков, ИМаш им. А.М. Подгорного, 2000. – Т. 3, – № 1–2. – С. 29 – 33.

*Здобувач виконав розрахунки ступені турбулентності в загальмованому потоці з використанням нової залежності та їх порівняння з експериментальними даними.*

5. Е.Н. Иванченко. Сравнительные расчеты модифицированных моделей турбулентности / В.М. Капинос, Е.Н. Иванченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – №5. – С. 71–76.

*Здобувач виклав основні залежності модифікованої моделі турбулентності на основі універсальних профілів швидкості Томпсона та Коулса та виконав порівняльні розрахунки інтегральних характеристик турбулентного пограничного шару, які отримані з використанням цих моделей турбулентності*

6. Е.Н. Иванченко. Алгебраическая модель турбулентности для течений с повышенной степенью турбулентности внешнего потока / В.М. Капинос, В.Н. Пустовалов, Е.Н. Иванченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – №6. – С. 98 – 101.

*Здобувачем описана система рівнянь, що описують модель турбулентності, яка враховує ступінь турбулентності зовнішнього потоку та проведені порівняльні розрахунки інтегральних характеристик турбулентного приграничного шару з використанням нової моделі.*

7. Е.Н. Иванченко. Расчет пограничного слоя на лопатке газовой турбины с использованием модифицированной модели турбулентности Себеси-Смитта // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – №3. – С. 134–137.

8. Иванченко Е.Н. Расчет пограничного слоя на лопатке газовой турбины с использованием модели турбулентности, учитывающей степень турбулентности внешнего потока // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – №3. – С. 85–87.

9. Иванченко Е.Н. Модификация модели турбулентности Себеси-Смитта // Механика жидкости и газа: Материалы IV Международной научно-технической студенческой конференции (Донецк, 6-8 декабря 2005 г.). – Донецк: ДонНТУ, 2005. – С. 77-79.

10. Иванченко О.М. Використання моделі турбулентності, яка враховує ступінь турбулентності зовнішнього потоку, для розрахунків турбулентного прикордонного шару на лопатці газової турбіни (тези доповіді) // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XVIII міжнародної науково-практичної конференції (Харків, 12-14 травня 2010 року). У чотирьох частинах. Ч.1.– Харків, НТУ «ХПІ», - 2010. – с. 293.

## АНОТАЦІЇ

**Іванченко О.М. Розрахункові дослідження теплообміну на лопатках газових турбін з використанням модифікованих алгебраїчних моделей турбулентності. На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, 2012 р.

Дисертація присвячена удосконаленню методики розрахунку теплообміну на лопатці газової турбіни за рахунок використання нових і модифікованих алгебраїчних моделей турбулентності, які враховують такі особливості обтікання лопатки, як наявність подовжнього градієнта тиску і підвищеного ступеня турбулентності зовнішнього потоку.

Розроблена математична модель розрахунку параметрів течії і теплообміну по обводу профілю лопатки газової турбіни в зоні турбулентного режиму течії. У ній використані нові моделі турбулентності: модифікована модель турбулентності Себеси-Смітта, що враховує подовжній градієнт тиску, і модель на основі профілю швидкості Коулса, що дозволяє врахувати ступінь турбулентності набігаючого потоку. Вибір цих моделей обумовлений особливостями течії по обводу профілю лопатки газової турбіни.

Отриманий узагальнений закон стінки для опису градієнтних течій, що дозволяє зберегти лінійну залежність між безрозмірною швидкістю і числом Рейнольдсу для градієнтних течій.

Отримана дослідна залежність, що визначає міру турбулентності потоку, загальмованого на вхідній кромці лопатки у функції трьох аргументів : радіусу кромки, ступеня турбулентності набігаючого потоку, відстані від перерізу, де вимірювався ступінь турбулентності набігаючого потоку, до вхідної кромки.

Проведені розрахунки локального теплообміну по обводу профілю лопатки ТС-1А з використанням розробленої математичної моделі. Для перевірки точності розрахунків проведено порівняння з експериментальними даними. Результати свідчать про те, що ця модель може використовуватися для розрахунків локальних коефіцієнтів тепловіддачі на профілі лопатки.

*Ключові слова:* теплообмін, гідродинаміка, моделі турбулентності, градієнт тиску, ступінь турбулентності, чисельні розрахунки, лопатка газової турбіни.

**Иванченко Е.Н. Расчетные исследования теплообмена на лопатках газовых турбин с использованием модифицированных моделей турбулентности. На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.16 – турбомашин и турбоустановки. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, 2012 г.

Диссертация посвящена усовершенствованию методики расчета теплообмена на лопатке газовой турбины за счет использования новых и модифицированных алгебраических моделей турбулентности, которые учитывают такие особенности обтекания лопатки, как наличие продольного градиента давления и повышенной степени турбулентности внешнего потока.

Разработана математическая модель расчета параметров течения и теплообмена по обводу профиля лопатки газовой турбины в зоне турбулентного режима течения. В ней были использованы новые модели турбулентности, сформулированные в диссертационной работе. Это модифицированная модель турбулентности Себеси-Смитта, которая включает новую формулировку для описания длины пути смещения, отражающую нелинейность ее зависимости от координаты, нормальной к плоскости стенки. Также в данной модели используется зависимость константы турбулентности от градиента давления. Вторая модель турбулентности основывается на использовании универсального профиля скорости Коулса и позволяет учесть степень турбулентности набегающего потока, а также рассчитывать турбулентную вязкость с применением алгебраического дифференцирования профиля скорости и вычисления производной скорости по координате. Выбор данных моделей обусловлен особенностями течения по обводу профиля лопатки газовой турбины.

Проведены детальные сравнительные расчеты турбулентного пограничного слоя с использованием наиболее распространенных алгебраических моделей турбулентности Себеси-Смитта, Болдвина-Ломмакса, «гибридной» модели турбулентности Джонсона-Кинга и предлагаемых моделей. Сравнение проводилось на основе интегральных характеристик пограничного слоя, в качестве принимались опытные данные, опубликованные в трудах Стенфордской конференции, которые принято считать каноническими. В целом отклонения расчетных значений интегральных

характеристик по моделям Себеси-Смитта и Болдвина-Ломмакса от опытных примерно одинаковы, поэтому отдать предпочтение какой-либо из сравниваемых моделей затруднительно. Существенно более точные результаты расчета турбулентных течений по сравнению с ними дают вычисления по модели Джонсона-Кинга. Новые модели турбулентности позволяют рассчитывать параметры течения в пограничном слое с точностью, сопоставимой с моделью Джонсона-Кинга при более простом алгоритме вычислений.

Получен обобщенный закон стенки для описания градиентных течений, позволяющий сохранить линейную зависимость между безразмерной скоростью и числом Рейнольдса для градиентных течений. Обобщенный закон стенки позволяет заметно повысить точность определения коэффициента поверхностного трения методом Клаузера за счет увеличения числа используемых для сравнения опытных точек, расположенных во внешней части пограничного слоя, где распределение скорости при градиентном течении не подчиняется известному закону стенки.

Для более точного расчета течения с повышенной степенью турбулентности внешнего потока получена опытная зависимость, определяющая степень турбулентности потока, заторможенного на входной кромке лопатки в функции трех аргументов: радиуса кромки, степени турбулентности набегающего потока, расстояния от сечения, где измерялась степень турбулентности набегающего потока, до входной кромки.

Проведены расчеты локального теплообмена по обводу профиля лопатки ТС-1А с использованием разработанной математической модели. Для проверки точности расчетов проведено сравнение с экспериментальными данными. Результаты свидетельствуют о том, что данная модель может использоваться для расчетов локальных коэффициентов теплоотдачи на профиле лопатки.

*Ключевые слова:* теплообмен, гидродинамика, модели турбулентности, градиент давления, степень турбулентности, численные расчеты, лопатка газовой турбины.

**Ivanchenko L.N. Calculation researches of heat transfer are on the blades of gas turbines with the use of the modified algebraic models of turbulence. Manuscript.**

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in speciality 05.05.16 – Turbomachine and Turbo-installation. – National Technical University “Kharkiv Politechnical Institute”, 2012.

Dissertation is sanctified to the improvement of methodology of calculation of heat transfer on the blade of gas turbine due to the use of new and modified models algebraic of turbulence, that take into account such features of flowing around of blade, as a longitudinal gradient of pressure and increase degree of turbulence of external stream.

The worked out mathematical model of calculation of parameters of flow and heat transfer is along the profile of blade of gas turbine in the zone of the turbulent mode of flow. In it the new models of turbulence are used: the modified model of turbulence of Sebeci-Smitta, that takes into account the longitudinal gradient of pressure, and model on the basis of profile of speed of Coles, that allows to take into account the degree of turbulence of appearing suddenly stream. The choice of these models is conditioned by the features of flow along the profile of blade of gas turbine.

Got generalized law of wall for description of gradient flows, that allows to save linear dependence between dimensionless speed and number to Reynolds for gradient flows.

Got experience dependence, that determines the degree of turbulence of the stream, put on the brakes on the entrance edge of blade in the function of three arguments : of radius of edge, degree of turbulence of appearing suddenly stream, distance from a cut, where the degree of turbulence of appearing suddenly stream was measured, to the entrance edge.

The conducted calculations of local heat transfer are along the profile of blade of TC-1A with the use of the worked out mathematical model. For verification of exactness of calculations comparing is conducted to experimental data. Results testify that this model can be used for the calculations of local coefficients of heat emission on the profile of shoulder-blade.

*Keywords:* heat transfer, hydrodynamics, models of turbulence, gradient of pressure, degree of turbulence, numeral calculations, blade of gas turbine.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'S. Sebeci' or similar, located at the bottom right of the page.