

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОЇ СХЕМИ ТЕПЛОВІДВЕДЕННЯ ВІД ОБЕРТОВОГО ЦИЛІНДРА У СИСТЕМАХ РОТОР-СТАТОР

SUBSTANTIATION OF THE EFFECTIVE SCHEME OF HEAT REMOVAL FROM A ROTATING CYLINDER IN THE ROTOR-STATOR SYSTEMS

На основі аналізу літературних джерел обґрунтовано науково-технічну проблему розроблення суттєво нової високоефективної схеми тепловідведення від роторів електричних машин та валів турбомашин, яка відрізняється від стандартної схеми охолодження осьовим потоком повітря через зазор між ротором та статором. За допомогою методів числового моделювання побудовано три принципові розрахункові моделі на основі яких виконано розрахунки гідродинаміки і теплообміну в сегменті кільцевого зазору між циліндрами при різних вихідних параметрах. На їх основі проведено порівняння ефективності традиційних схем повітряного і рідинного охолодження ротора із новою схемою повітряного охолодження крізь обертову проникну поверхню. Одержано нові залежності, які обґрунтовують області оптимального застосування кожної схеми. Зокрема, показано, що схема з радіальним потоком повітря через кільцевий зазор забезпечує меншу середню температуру ротора, ніж схема з осьовим потоком повітря, і найменшу із всіх схем нерівномірність охолодження його поверхні. Дослідження базуються на нових теоретичних даних з гідродинаміки і теплообміну в обертових системах (течія Куета–Тейлора в областях з проникними стінками) та на сучасних досягненнях обчислювальної гідродинаміки.

Ключові слова: електричні машини, охолодження, ротор, статор, температура, числове моделювання.

Вступ

Тепловідведення від роторів електричних машин та валів турбомашин є актуальною технічною задачею, від вирішення якої залежить ефективність сучасного енергетичного обладнання. У більшості практично важливих випадків мова йде про обертання циліндра (ротора), що нагрівається у обмеженому просторі. Найчастіше має місце циліндрична обмежуюча поверхня (статор).

У авіакосмічній техніці існує багато пристроїв, які потребують ефективного тепловідведення від обертового циліндра за умов високої надійності та масогабаритних обмежень. До таких пристроїв можна віднести [1]: малогабаритні електродвигуни для повітряних засувок системи кондиціонування повітря, електромеханізми для привода паливних кранів на літаках, для привода насосів системи рідинного охолодження бортової апаратури, двоканальні електромашини підвищеної надійності в системі управління різними рульовими поверхнями літака та ін.

Стан проблеми і завдання дослідження

Найбільш поширеними способами охолодження роторів є продувка зазору між ротором і статором потоком повітря, розприскування мастила і прокачка рідкого охолоджувача крізь канали у роторі. Повітряне охолодження легко реалізувати технічно, але воно є обмеженим відносно малими величинами теплового

потоку. Рідинне охолодження характеризується набагато більшими значеннями коефіцієнта тепловіддачі, але дуже ускладнює конструкцію та технологію виготовлення устаткування, збільшує його габарити та масу.

Нещодавно отримано нові фундаментальні результати для сполученої задачі гідродинаміки та теплообміну у потоці Куета–Тейлора з вимушеним радіальним потоком рідини (газу) крізь проникні поверхні циліндрів [2–8]. Вони зокрема демонструють можливість отримання більших значень коефіцієнта тепловіддачі від поверхні обертового циліндра при вимушеному радіальному потоці крізь зазор між ротором і статором у порівнянні з вимушеним осьовим потоком.

На основі останніх досліджень стає можливим розгляд питання про ефективність практичного застосування способу охолодження роторів електричних машин, а також інших пристроїв на основі вимушеного потоку повітря крізь проникні поверхні ротора та статора. Цій науково-технічній проблемі присвячено роботу.

Характеристика основних результатів дослідження

Основним методом досліджень є числове моделювання сполученої задачі гідродинаміки та теплообміну зовні та всередині обертового циліндра із поздовжніми щілинами. Використовується метод скінчених об'ємів [9–11] із застосуванням апроксимаційних схем високого

порядку та контролю збіжності, які відповідають сучасним досягненням обчислювальної гідрогазодинаміки [12—13].

Вибір SST $k-\omega$ моделі турбулентності для моделювання потоків навколо обертового проникного циліндра базується на дослідженнях і тестуванні, які виконано у роботах [4,14].

Розглянуто три схеми охолодження обертового циліндра (рисунки 1—3) при значенні об'ємної щільності джерела тепловиділення $q = 10^6 \text{ Вт/м}^3$ та сумарній потужності тепловиділення $Q = 32 \text{ Вт}$. Перша схема характеризується спливанням води через поздовжні щілини у роторі в осьовому напрямі, друга — спливанням повітря в осьовому напрямі крізь кільцевий зазор між непроникними поверхнями ротора і статора, третя — перебігом повітря у радіальному напрямі крізь перфорований (пористий) статор і поздовжні щілини у роторі.



Рисунок 1 — Водяне охолодження крізь канали у роторі (1-а схема)

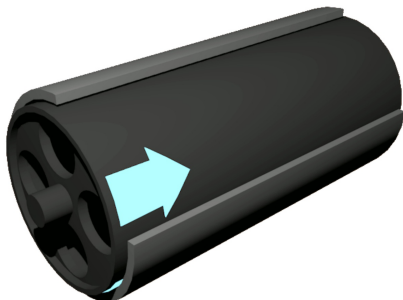


Рисунок 2 — Охолодження осьовим потоком повітря крізь зазор між ротором і статором (2-а схема)

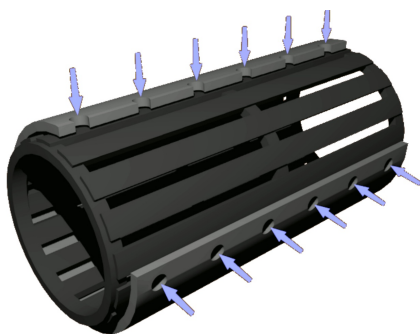


Рисунок 3 — Охолодження радіальним потоком повітря крізь перфоровану поверхню статора і поздовжні щілини у роторі (3 — а схема)

Для побудови моделей було обрано фрагмент спрощеної схеми ротор-статор з такими вихідними геометричними параметрами:

- зовнішній і внутрішній радіуси порожнистого ротора

$$R = 0,1 \text{ м}, R_1 = 0,09 \text{ м};$$

- внутрішній радіус статора

$$R_2 = 1,05 \text{ м};$$

- число і ширина поздовжніх щілин

$$n_b = 16, b = 0,005 \text{ м};$$

- довжина ротора уздовж осі обертання

$$L = 0,1 \text{ м}.$$

Границі розрахункової області і сітка показані на рисунках 4, 5. На вхідних границях задавалося значення швидкості (за її рівномірного розподілу), яке відповідає витраті охолоджувача, а також інтенсивність турбулентності та її характерний масштаб. На вихідних границях задавалось значення тиску. На границях, що утворені площинами, які вирізають сегмент, використано граничні умови колової періодичності. На твердих стінках виставлено умови «прилипання» і використовується «низкорейнольдсовий» підхід до моделювання турбулентності [10—14].

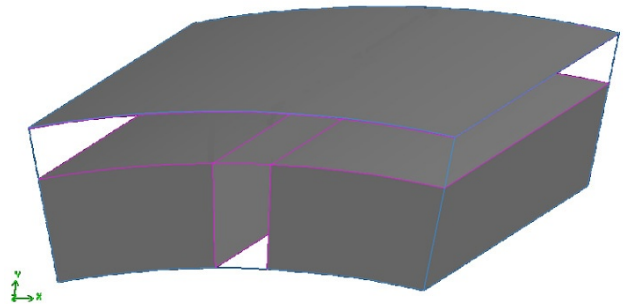


Рисунок 4 — Тверді стінки у розрахунковій області

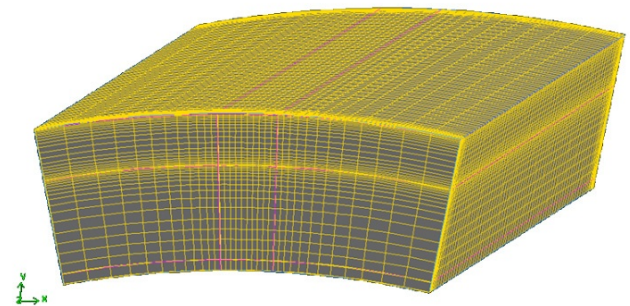


Рисунок 5 — Розрахункова сітка зі згущенням поблизу твердих поверхонь

Водяне охолодження крізь поздовжні канали порівнювалось із повітряним охолодженням з осьовим та радіальним потоками крізь кільцевий зазор при однаковій масовій витраті охолоджувача $G = 0,5 \text{ г/с}$. Початкова температура охолоджувача та температура статора прийняті однаковими ($T_0 = 303 \text{ К}$) і також незмінними

для усіх варіантів. Розглядалися розрахункові варіанти при різних кутових швидкостях циліндра в діапазоні $\Omega = 10 \div 250 \text{ c}^{-1}$.

Середня температура поверхні обертового циліндра при кутовій швидкості $\Omega = 150 \text{ c}^{-1}$ для варіанта з водяним охолодженням склала $T_m = 325 \text{ K}$. Для повітряного охолодження с поздовжнім та поперечним потоками крізь зазор маємо $T_m = 450 \text{ K}$ і $T_m = 401 \text{ K}$ відповідно. Часто до уваги треба приймати нерівномірність нагріву поверхні ротора. Вона оцінювалась як значення нормалізованої різниці між максимальною та мінімальною температурами — $k_T = (T_{\max} - T_{\min})/T_m$. Для трьох варіантів було отримано наступні значення k_T (у тієї ж послідовності): 0.068204, 0.064039, 0.024542.

Інтегральний коефіцієнт тепловіддачі визначимо як

$$\alpha = Q/[S(T_m - T_0)] = (\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2)/S,$$

де α_1 — коефіцієнт тепловіддачі, що відповідає відводу тепла з потоком охолоджувача, α_2 — коефіцієнт тепловіддачі, що відповідає відводу тепла через стінку статора, S_1 — площа поверхні ротора в контакті з теплоносієм (вода/повітря), S_2 — площа твердої поверхні ротора.

Вплив вимушеного обертального руху в даній задачі будемо оцінювати обертальним числом Рейнольдса $Re_\phi = \Omega R^2/\nu$.

Ми прогнозуємо бачимо (рисунок 6) більший інтегральний коефіцієнт тепловіддачі для схеми з водяним охолодженням.

При цьому повітряне охолодження з радіальним (поперечним) потоком забезпечує у півтора рази менший нагрів ніж в пошпиреному варіанті з осьовим потоком

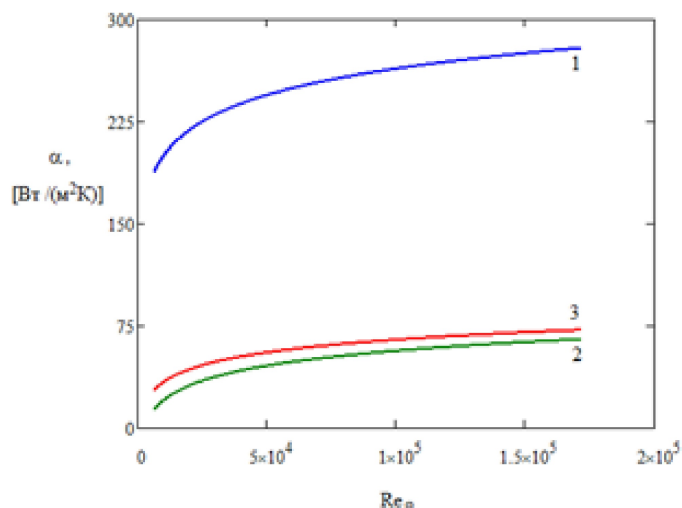


Рисунок 6 — Порівняння схем охолодження за коефіцієнтами тепловіддачі: 1 — водяне охолодження; 2 — повітряне осьове; 3 — повітряне радіальне

Нерівномірність нагріву у варіанті з поперечним потоком повітря крізь зазор є найменшою — у 2,77 разів менше ніж при водяному охолодженні і в 2,81 разів менше ніж у альтернативній схемі повітряного охолодження, що

можна спостерігати на графіку (рисунок 7). Сюди слід додати, що у варіанті з радіальним потоком повітря (3 схема) значення T_m і особливо k_T можуть бути зменшені за рахунок збільшення числа поздовжніх щілин для повітря у обертовому циліндрі за їх незмінної сумарної площі (розглядався випадок 16 щілин із загальною площею 15% від повної площі поверхні циліндра). Інші схеми не мають такого конструктивного резерву.

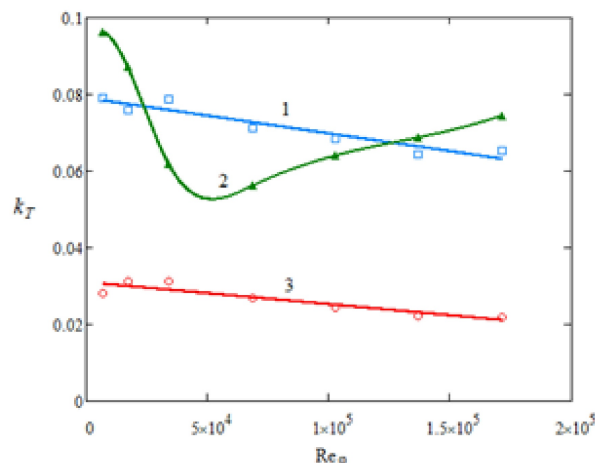


Рисунок 7 — Нерівномірність температури поверхні ротора: 1 — водяне охолодження; 2 — повітряне осьове; 3 — повітряне радіальне

Вплив вимушеного обертального руху в даній задачі будемо оцінювати обертальним числом Рейнольдса $Re_\phi = \Omega R^2/\nu$.

Ми прогнозуємо бачимо (рисунок 6) більший інтегральний коефіцієнт тепловіддачі для схеми з водяним охолодженням.

Крім того, у варіантах, що розглядалися, відношення довжини кільцевого зазору до його ширини $\tilde{A} = L/h$ було прийнято $\tilde{A} = 20$. На практиці воно часто буває значно більшим (наприклад, для зазорів між ротором і статором у електромашинах). Зі збільшенням відносної довжини суттєво зменшується загальна ефективність охолодження і ступінь нерівномірності нагріву ротора для схем з поздовжнім потоком охолоджувача (як газу, так і рідини). В той же час схема з радіальним потоком охолоджуючого повітря є практично нечутливою до цього фактору.

Також було проведено порівняння за безрозмірним коефіцієнтом тепловіддачі — числом Стентона, яке співставляє інтегральний коефіцієнт тепловіддачі з витратою охолоджувача та його теплоємністю

$$St = \alpha / (Uc_p \rho).$$

З рисунку 8 видно, що 3-я схема має значні переваги над іншими за цим критерієм, що означає істотно більший приріст тепловіддачі за однакового збільшення витрати охолоджувача.

Висновки

Схема з радіальним потоком повітря крізь кільцевий зазор забезпечує меншу середню температуру ротора, на відміну від схеми з осьовим потоком повітря найменшу із усіх схем нерівномірність охолодження і найбільше значення безрозмірного коефіцієнту тепловіддачі. Ця схема на відміну від інших нечутлива до збільшення довжини ротора. Це дозволяє розширити діапазон застосування повітряного охолодження, яке є більш технологічним у порівнянні з рідинним охолодженням, забезпечує меншу масу і габарити та більший рівень надійності агрегата, що є суттєвим для авіаційної промисловості.

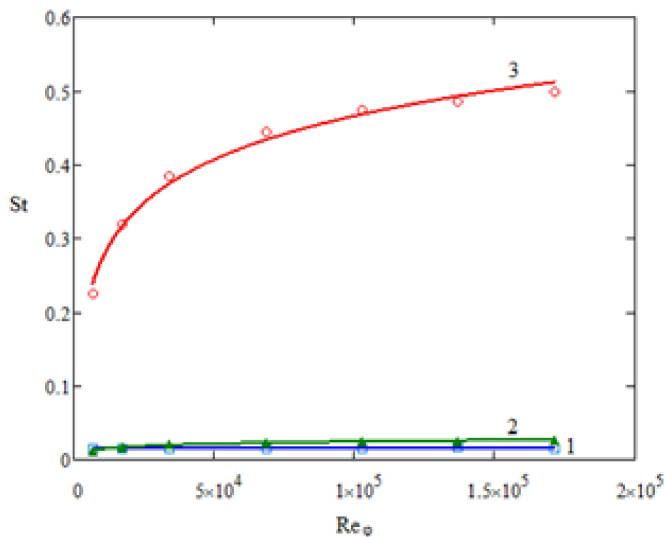


Рисунок 8 — Порівняння безрозмірних коефіцієнтів тепловіддачі для трьох схем охолодження, що розглядаються (номера кривих відповідають номерам схем)

Виконаним дослідженням обґрунтовано перспективність технічної реалізації нової схеми охолодження роторів електродвигунів в системах обладнання авіакосмічної техніки, а також створення нових конструкцій ротаційних малогабаритних теплообмінників.

Література

1. Овечкин, О.И. Электродвигатели и исполнительные электромеханизмы ОАО «Электропривод» / О.И. Овечкин, В.А. Миронов // *Электротехника и электропривод*. — 2011. — №4. — С. 2—8.
2. Мочалин, Е.В. Особенности моделирования макро-вихревых течений жидкости вблизи вращающегося проницаемого цилиндра [Текст] / Е.В. Мочалин // *Вісник Східноукраїнського національного університету*. — 2007. — №12(118). — С. 146—153.
3. Мочалин, Е.В. Особенности проявления центробежной неустойчивости снаружи вращающегося цилиндра при протоке жидкости через его поверхность [Текст] /

Е.В. Мочалин, И.Г. Мочалина // *Вісник Національного техн. ун-ту «ХП»*. Зб. наук. праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. — 2010. — № 57. — С. 108—113.

4. Мочалин, Е.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил [Текст] / Е.В. Мочалин, А.А. Халатов.— К.: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2010. — Т. 8: Гидродинамика закрученного потока в ротационных фильтрах. — С. 428.

5. Mochalin, Ye.V. Centrifugal instability and turbulence development in Taylor–Couette flow with forced radial throughflow of high intensity / Ye.V. Mochalin, A.A. Khalatov // *Physics of Fluids*. — 2015. V. 27, 094102 ; doi: 10.1063/1.4930605.

6. Мочалин, Е.В. Интенсивность обмена импульсом и теплотой в потоке снаружи вращающегося проницаемого цилиндра / Е.В. Мочалин, С.А. Юрьев // *Промислова гідравліка і пневматика*.— 2011. — №4(34). — С. 11—14.

7. Мочалин, Е.В. Теплообмен и гидравлические потери в потоке между соосными вращающимися цилиндрами при расходном течении жидкости / Е.В. Мочалин, И.Г. Мочалина // *Промислова гідравліка і пневматика*. — 2013. — №2 (40). — С. 41—46.

8. Мочалин, Е.В. Теплообмін і гідравлическі втрати в зазорі між обертовими циліндрами / Е.В. Мочалин, С.А. Юрьев // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. Том 3, №1(11). — 2013. — С. 46—49.

9. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар.— М.: Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.

10. Роуч, П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. — М.: Мир, 1982. — 616 с.

11. Ferziger, J.H. Computational methods for fluid dynamics / J.H. Ferziger, M. Peric. — Berlin, Heidelberg, 1999.—389 p.

12. Приходько, А.А. Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене / А.А. Приходько.— К.: Наукова Думка, 2003.— 379 с.

13. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб [Текст] / Ю.А. Быстров, С.А. Исаев, Н.А. Кудрявцев, А.И. Леонтьев. — СПб.: Судостроение, 2005.— 392 с.

14. Мочалин, Е.В. Выбор модели турбулентности для анализа течения снаружи вращающегося проницаемого цилиндра / Е.В. Мочалин // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. — 2007. — № 2/6 (26). — С.20—26.

References

1. Ovechkin, O.I. Elektrodvigateli i ispolnitelnye elektromekhanizmy OAO «Elektroprivod» / O.I. Ovechkin, V.A. Mironov // Elektrotehnika i elektroprivod.—2011.— №4.— S. 2—8.

2. Mochalin, Ye.V. Osobennosti modelirovaniya makrovikhrevykh techeniy zhidkosti vblizi vrashchayushchegosya pronitsayemogo cilindra [Tekst] / Ye.V. Mochalin // Visnik Skhidnoukrayinskogo natsionalnogo universitetu.—2007.— №12(118).— S. 146—153.

3. Mochalin, Ye.V. Osobennosti proyavleniya tsentrobeznoi neustoichivosti snaruzhi vrashchayushchegosya cilindra pri protoke zhidkosti cherez yego poverkhnost [Tekst] / Ye.V. Mochalin, I.G. Mochalina // Visnik Nacionalnogo tekhnichnogo un-tu «KhPI». Zb. nauk. prats. Tematychnyi vypusk: Novi rishennya v suchasny tekhnologii.— 2010.— №57.— S. 108—113.

4. Mochalin, Ye.V. Teploobmen i gidrodinamika v polyakh centrobeznykh massovykh sil [Tekst] / Ye.V. Mochalin, A.A. Khalatov.—K.: In-t tekhn. teplofiziki NAN Ukrainy, 2010.— T.8: Gidrodinamika zakruchennogo potoka v rotacionnykh filtrakh.— 428 s.

5. Mochalin, Ye.V. Centrifugal instability and turbulence development in Taylor–Couette flow with forced radial throughflow of high intensity / Ye.V. Mochalin, A.A. Khalatov // Physics of Fluids.— 2015.— V. 27, 094102 ; doi: 10.1063/1.4930605.

6. Mochalin, Ye.V. Intensivnost obmena impulsom i teplotoy v potoke snaruzhi vrashchayushchegosya pronitsayemogo cilindra / Ye.V. Mochalin, S.A. Yuryev // Promyslova gidravlika i pnevmatyka.— 2011.— №4(34).— S. 11—14.

7. Mochalin, Ye.V. Teploobmen i gidravlicheskie poteri v potoke mezhdru soosnymi vrashchayushchimisya cilindrami pri rashodnom techenii zhidkosti / Ye.V. Mochalin, I.G. Mochalina // Promyslova gidravlika i pnevmatyka.— 2013.— №2(40).— S. 41—46.

8. Mochalin, Ye.V. Teploobmin i gidravlichni vtraty v zazori mizh obertovymi cylindrami / Ye.V. Mochalin, S.A. Yur'ev // Tekhnologichniy audit ta rezervy vyrobnytstva. Tom 3, №1(11). — 2013.— S. 46—49.

9. Patankar, S. Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti / S. Patankar.— M.: Energoatomizdat, 1984. — 152 s.

10. Rouch, P. Vychislitel'naya gidrodinamika / P. Rouch.— M.: Mir, 1982. — 616 s.

11. Ferziger, J.H. Computational methods for fluid dynamics / J.H. Ferziger, M. Peric. — Berlin, Heidelberg, 1999. — 389 p.

12. Prihodko, A.A. Kompyuternyye tekhnologii v aerogidrodinamike i teplomassoobmene / A.A. Prihodko. — K.: Naukova Dumka, 2003.— 379 s.

13. Chislennoye modelirovanie vikhrevoy intensifikatsii teploobmena v paketakh trub [Tekst] / Yu.A. Bystrov, S.A. Isaev, N.A. Kudryavcev, A.I. Leontiev.—SPb.: Sudostroyeniye, 2005.— 392 s.

14. Mochalin, Ye.V. Vybory modeli turbulentsnosti dlia analiza techeniya snaruzhi vrashchayushchegosya pronitsayemogo cilindra / Ye.V. Mochalin // Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy.— 2007. — № 2/6 (26). — S. 20—26.

Надійшла 21.12.2015 року

УДК 621.313.617.71.001.24

Обоснование эффективной схемы теплоотвода от вращательного цилиндра в системах ротор-статор

**Е.В. Мочалин,
В.А. Коноваленко**

На основе анализа литературных источников обоснована научно-техническая проблема разработки принципиально новой высокоэффективной схемы теплоотвода от роторов электрических машин и валов турбомашин, которая отличается от стандартной схемы охлаждения осевым потоком воздуха через зазор между ротором и статором. С помощью методов численного моделирования построено три принципиальные расчетные модели, на основе которых выполнены расчеты гидродинамики и теплообмена в сегменте кольцевого зазора между цилиндрами при разных исходных параметрах. На этой основе проведено сравнение эффективности традиционных схем воздушного и жидкостного охлаждения ротора с новой схемой воздушного охлаждения сквозь вращающуюся проницаемую поверхность. Получены новые зависимости, которые обосновывают области оптимального применения каждой схемы. В частности, показано, что схема с радиальным потоком воздуха через кольцевой зазор обеспечивает меньшую среднюю температуру ротора, чем схема с осевым потоком воздуха, и наименьшую из всех схем неравномерность охлаждения его поверхности. Исследования базируются на новых теоретических данных по гидродинамике и теплообмену во вращающихся системах (течение Куэтта—Тейлора в областях с проницаемыми стенками) и на современных достижениях вычислительной гидродинамики.

Ключевые слова: электрические машины, охлаждение, ротор, статор, температура, численное моделирование.

UDK 621.313.617.71.001.24

Substantiation of the effective scheme of heat removal from a rotating cylinder in the rotor-stator systems

**Ye.V. Mochalin,
V.O. Konovalenko**

On the basis of the analysis of the literature sources there was grounded the scientific and technical problem of developing of significantly new high-performance scheme of heat removal from the rotors of electric machines and turbine shafts. It differs from the standard cooling schemes with the axial air flow through the gap between the rotor and stator. By means of numerical simulation three principal calculation mod-

elswhere constructed for calculations of fluid dynamics and heat transfer in the cylinder segment with different initial parameters. Basing on the simulations, the comparison was performed of the effectiveness of traditional schemes of rotor air and liquid cooling to the new scheme of air cooling through the rotating permeable surface. New dependencies were obtained, justifying the range of optimal usage of each scheme. It is shown, for instance, that the scheme with radial air flow through the annular gap provides the lowest mean rotor temperature comparing to the configuration with axial air flow. It provides as well the most uniform cooling of the rotor surface. The researches are based on the new theoretical data on fluid dynamics and heat transfer in rotating systems (Taylor-Couette flow in the domains with permeable walls) and the achievements of modern computational fluid dynamics.

Keywords: electric machines, cooling, rotor, stator, temperature, numerical simulation.