

УДК 621.165 : 519.63

В. М. ПУСТОВАЛОВ, канд. техн. наук; проф. кафедри «Турбінобудування» ім. проф. В.М. Маковського НТУ «ХП»;

Л. В. ФАТІЧ, магістр кафедри «Турбінобудування» ім. проф. В.М. Маковського НТУ «ХП»;

С. П. НАУМЕНКО, м.н.с. кафедри «Турбінобудування» ім. проф. В.М. Маковського НТУ «ХП»

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ СЕРЕДОВИЩА ЧЕРЕЗ ЛАБІРИНТОВЕ УЩІЛЬНЕННЯ ТУРБОМАШИНИ

Проведено математичне моделювання гідродинаміки і тепловіддачі потоку середовища у прямооточному та ступінчатому лабіринтових ущільненнях турбомашин за допомогою комплексу прикладних програм. Зіставлення результатів з відповідним фізичним експериментом показало адекватність використаного підходу і обґрунтувало можливість застосування його при розв'язанні конкретних інженерних задач.

Ключові слова: турбомашини, лабіринтові ущільнення, гідродинаміка, тепловіддача, математичне моделювання.

Вступ

Завдання підвищення надійності та економічності роботи турбоустановок, а також вдосконалення конструкцій турбін визначають необхідність глибокого і всебічного вивчення процесів, що в них протікають.

У сучасних потужних парових і газових турбінах лабіринтові ущільнення займають значну частину поверхні роторів і корпусних деталей. Наприклад, в циліндрі високого тиску (ЦВТ) парової турбіни ВАТ «Турбоатом» К-325-24,5 на лабіринтові ущільнення припадає близько 60 % його довжини.

Звідси випливає, що для адекватної ідентифікації теплового, термонапруженого і термодетформованого стану ЦВТ таких турбін потрібні уточнені відомості по граничних умовах теплообміну в лабіринтових ущільненнях. Це є особливо важливим при математичному моделюванні, що має на увазі пошук оптимальних графіків пуску потужних парових турбін із різних початкових станів.

У відомих до кінця минулого століття публікаціях з даного питання основним методом дослідження був експеримент, що було наслідком недостатнього рівня розвитку і використання обчислювальної техніки та обчислювальної гідродинаміки в інженерних додатках в галузі теплоенергетики. З іншого боку, дорожнеча та методичні труднощі постановки відповідних експериментів з'явилися причиною нечисленності таких робіт і неузгодженості їх результатів [1].

На рис. 1 зіставлені дані по тепловіддачі в лабіринтових ущільненнях парових турбін, що отримані в ЦКТИ [2], 1961 р.; ИТЭ УССР [3], 1963 р.; ХПИ [4], 1970 р.; НЗЛ [5], 1972 р. Істотні відмінності в наведених залежностях свідчать про недостатню вивченість цього питання.

Робота [6] була присвячена математичному моделюванню тепловіддачі в елементі ступеневого ущільнення парової турбіни з термокомпенсаційною канавкою. Отримано розрахункові дані по величинам коефіцієнту тепловіддачі на різних етапах пуску турбіни. Однак адекватність математичного моделювання не була підтверджена зіставленнями з експериментальними результатами.

© В.М. Пустовалов, Л.В. Фатіч, С.П. Науменко, 2015

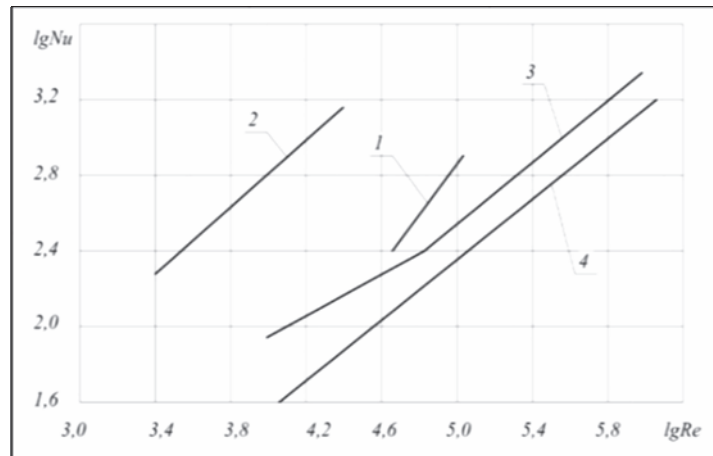


Рис. 1 – Тепловіддача на поверхні валу в прямоточному лабіринтовому ущільненні (відносний крок $S/H = 2,0$; відносний зазор $\delta/H = 0,137$) по даним: 1 – ЦКТИ – [1] 1961 р.; 2 – ИТЭ АН УССР – [2] 1963 р.; 3 – ХПИ – [3] 1970 р.; 4 – НЗЛ – [5] 1972 р.

1 Мета дослідження. Постановка задачі

Дослідження присвячено математичному моделюванню гідродинаміки і теплообміну при течії середовища в прямоточному і східчастому лабіринтових ущільнень засобами системи *Fluent* програмного пакету кінцево-елементного комплексу *ANSYS*.

На першому етапі дослідження, який описано в даній публікації, вивчалися можливості адекватного моделювання цього потоку шляхом зіставлення з результатами експериментів, що були проведені на кафедрі турбінобудування НТУ «ХПІ» Л. А. Гурою [1].

В подальшому планується розглядати особливості межових умов теплообміну у студійованій системі з урахуванням особливостей, що характерні для лабіринтових ущільнень ЦВТ потужних парових турбін на пускових режимах роботи.

2 Короткі відомості про опорні експерименти

Досліди по гідродинаміці потоку в ущільненнях проводилися на воді, а по вивченню тепловіддачі – на повітрі.

Експериментальне визначення коефіцієнтів тепловіддачі в прямоточному і східчастому лабіринтових ущільненнях частково здійснювалося на плоских статичних моделях на основі встановленого в низці більш ранніх досліджень факту, що ефект обертання валу на теплообмін не впливає при відношеннях окружної і витратної швидкості, менших ніж 2,2.

Досліджувалось східчасте ущільнення ЦВТ турбіни К-300-240 ХТГЗ з наступними розмірами: крок $S = 11,5$ мм, висота камери $H = 9$ мм, ширина і висота виступів 3,5 мм. Лінійні розміри моделі східчастого ущільнення були збільшені в 3 рази. В моделі прямоточного ущільнення східчаста поверхня замінялась плоскою. Моделі виготовлялись зі склотекстоліту. На нижні плити, які моделювали поверхню валу, наклеювались електронагрівачі з п'яти смуг фольги шириною 20 мм і товщиною 0,1 мм, які були з'єднані послідовно. Як вимірювальні використовувались середні електронагрівачі.

Вимірювалась витрата повітря, його температура на вході в модель, у камерах між гребнями і у вихідному перерізі за змішувачем, розподіл температури по довжині вимірної ділянки, перепад тиску на моделі і електрична потужність, що споживалась електронагрівачами. Термопари в камерах між гребнями розміщувались над вимірною

стрічкою посередині висоти каналу. В окремих дослідах вимірювався розподіл температури потоку як по довжині, так і по висоті камер.

Робоча ділянка моделі східчастого лабіринтового ущільнення представлена на рис. 2.

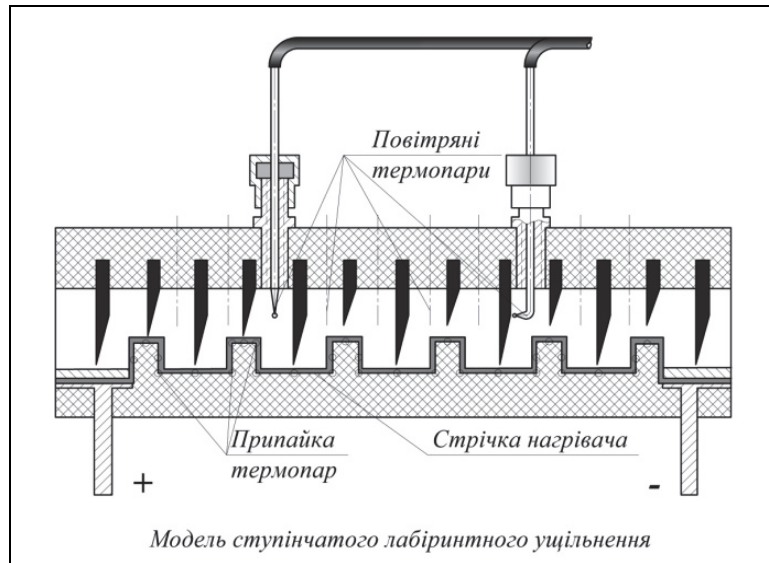


Рис. 2 – Модель східчастого лабіринтового ущільнення

3 Параметри математичного моделювання

При організації чисельного моделювання одним з визначальних моментів був вибір математичної моделі турбулентності (ММТ), яка найбільш відповідає фізичним особливостям течії, що розглядається.

Аналіз ММТ, які є складовими програмного комплексу, показав, що найбільш адекватною є модель турбулентних напруг Рейнольдса *RSM* (*Reynolds Stress Model*), яка здатна враховувати наявність в течії рециркуляційних областей і анізотропність властивостей течії.

Ця ММТ відноситься до класу моделей *RANS* (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*), тобто оперує з рівняннями переносу, осередненими за часом. Ряд моделей цього класу використовують допущення Буссінеска про ізотропність турбулентної в'язкості. Це, наприклад, ММТ $k-\epsilon$, $k-\omega$, *Spallard-Allmaras*. *RSM* реалізує альтернативний підхід: в рівняннях переносу для відповідних величин використовується обчислення компонентів тензорів.

Геометрія системи будувалась засобами модуля *ANSYS DesignModeller*. При побудові розрахункової сітки використовувалися методи *Edge sizing* та *Inflation*, що дало змогу згустити сітку біля стінок моделі та зробити її більш густою в зоні пограничного шару біля моделі ротору. Одна камера ущільнення при вивченні гідродинаміки включала 23500 розрахункових вузлів.

При моделюванні гідродинаміки задавались періодичні межові умови. Масова витрата на вході в розрахункову область обчислювалася залежно від значень чисел Re у фізичній моделі.

При вивченні теплообміну моделювалася течія середовища у 6 камерах ущільнення з метою забезпечення формування адекватних натурі межових умов на вході і виході третьої розрахункової камери.

Розрахункова сітка, що використовувалась при моделюванні тепловіддачі, показана на рис. 3.

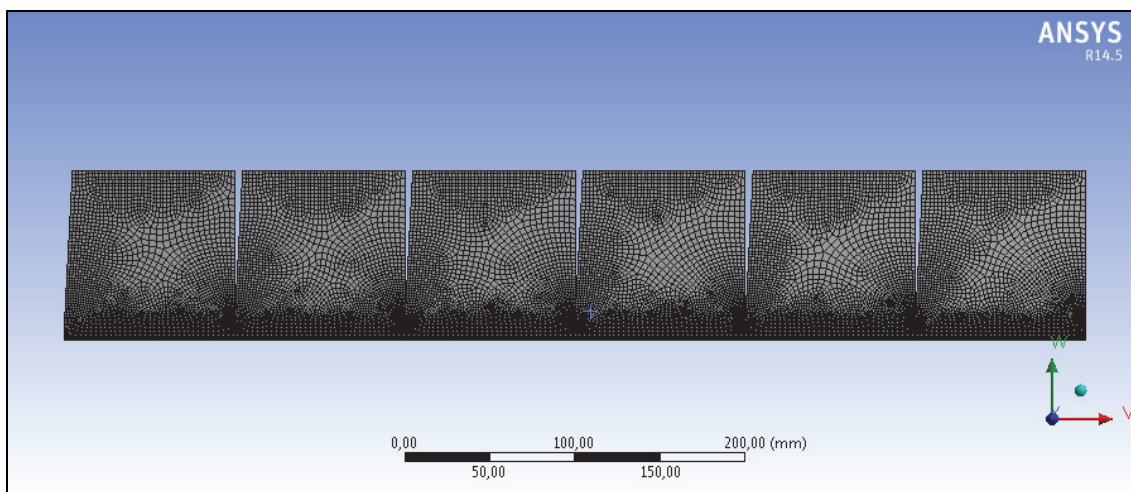


Рис. 3 – Розрахункова сітка, що використовувалась при моделюванні тепловіддачі

4 Результати математичного моделювання

На моделях прямооточного ущільнення математичні експерименти проводились при п'яти значеннях відносного кроку S/H , який змінювався в межах від 2,4 до 0,4. Величина зазору була постійною.

Як приклад, на рис. 4 надана картина ліній току в прямооточному ущільненні при $S/H = 0,57$, $\delta/H = 0,081$.

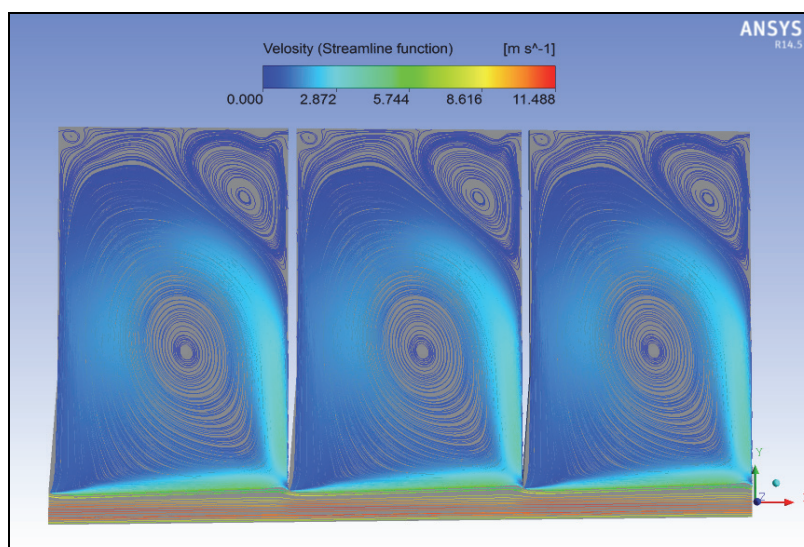


Рис. 4 – Структура потоку в прямооточному ущільненні при $S/H = 0,57$, $\delta/H = 0,081$

На рис. 5 зіставлені експериментальний і розрахунковий розподіл швидкості течії по висоті у камері прямооточного ущільнення з відносним кроком $S/H = 1$.

Приклад розрахункової структури потоку у ступінчатому ущільненні показано на рис. 6.

Зсув гребня ущільнення відносно виступу на роторі суттєво змінює картину ліній току у ступінчатому ущільненні. Це ілюструється рис. 7, на якому наведено результати моделювання при граничному зсуві гребня праворуч.

Одержані при математичному моделюванні картини ліній току, а також розрахункові поля швидкостей відповідали тим, що спостерігалися в роботі [1].

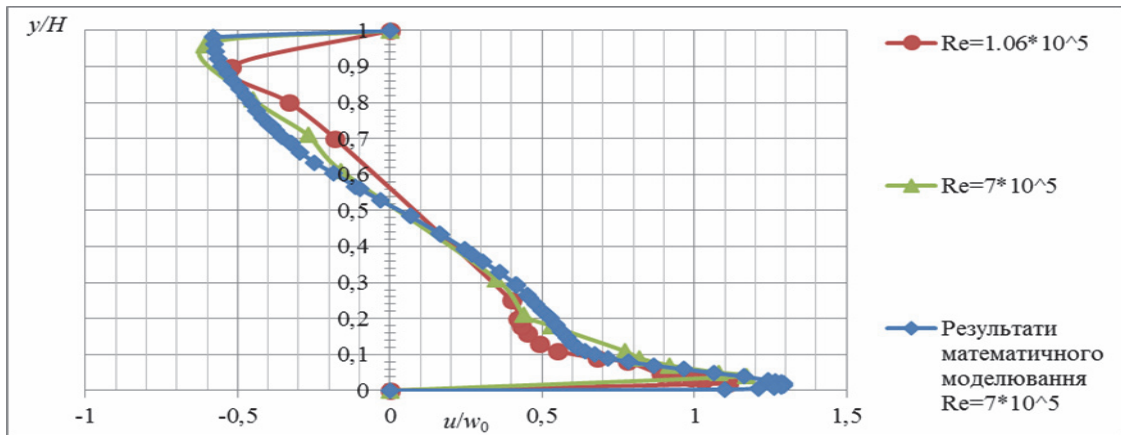


Рис. 5 – Зіставлення результатів моделювання з експериментом для розподілу відносної швидкості по висоті камери прямокутного ущільнення в середньому перерізі

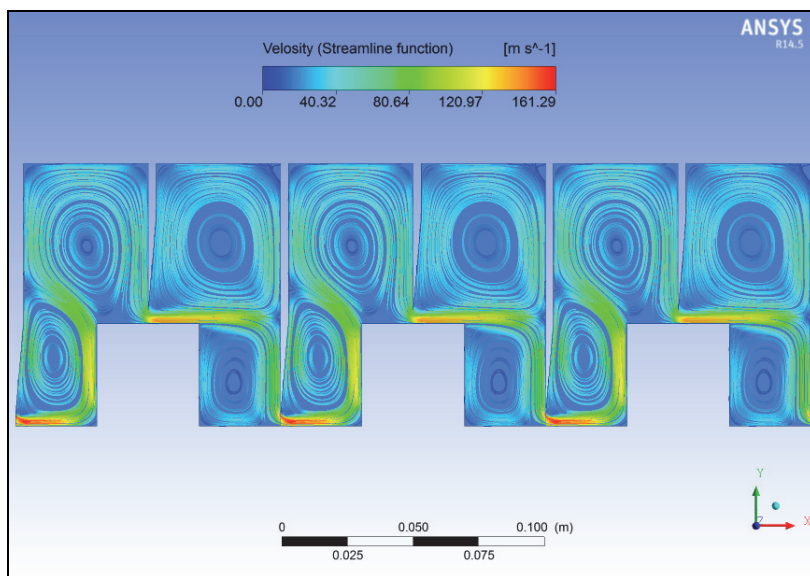


Рис. 6 – Структура потоку в ступінчастому ущільненні при $S/H = 1,01$, $\delta/H = 0,051$

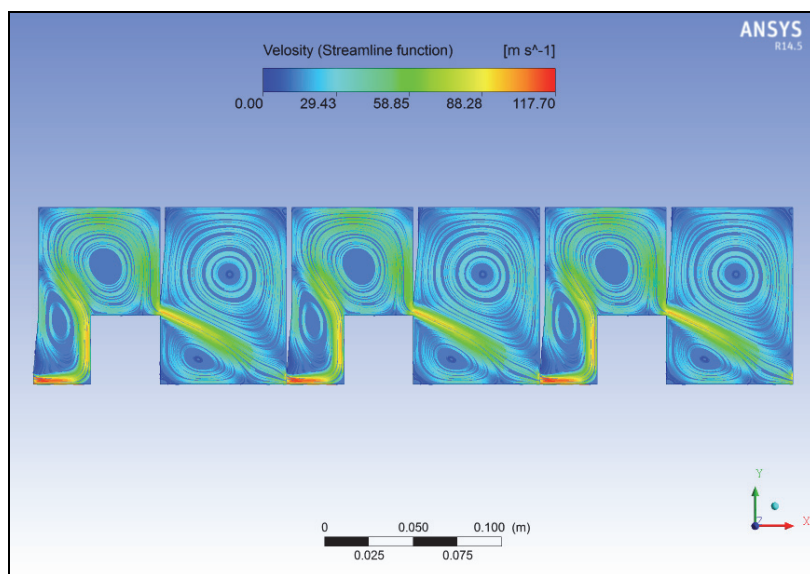


Рис. 7 – Структура потоку в ступінчастому ущільненні при $S/H = 1,43$, $\delta/H = 0,082$ при граничному зсуві гребня праворуч

Був проведений розрахунок теплообміну в лабіринтових прямоточних ущільненнях.

Визначальною температурою для критеріїв подібності була прийнята температура потоку в центрі камери прямоточного ущільнення. За розрахункову температуру ротора в межах камери приймалася його середня арифметична температура.

Приклади розподілу температури середовища по довжині фізичної моделі, а також по висоті камери ущільнення представлені на рис. 8 і 9. Вони якісно збігаються з графіками, що наведені в роботі [1]. Кількісного збігу не було можливості отримати, оскільки не була відома початкова температура середовища в експерименті, а також густина теплового потоку на пластині, що моделювала статор.

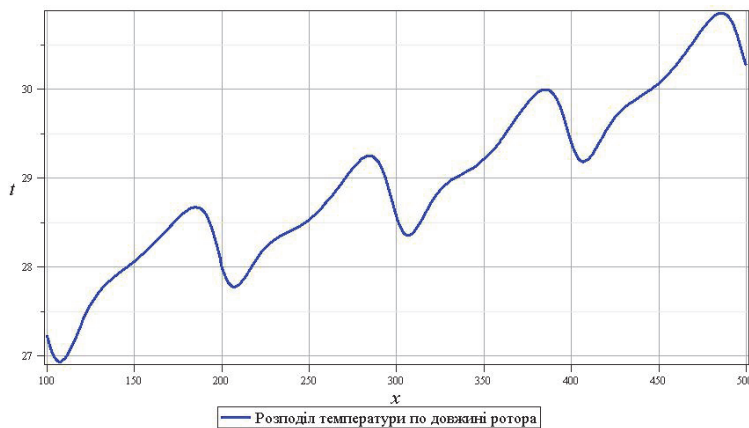


Рис. 8 – Розподіл температури течії по довжині фізичної моделі ротору

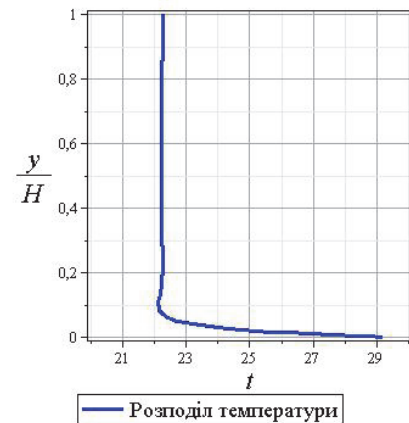


Рис. 9 – Розподіл температури по висоті камери прямоточного ущільнення

На рис. 10 порівнюються результати математичного моделювання з розрахунками по критеріальним залежностям роботи [1].

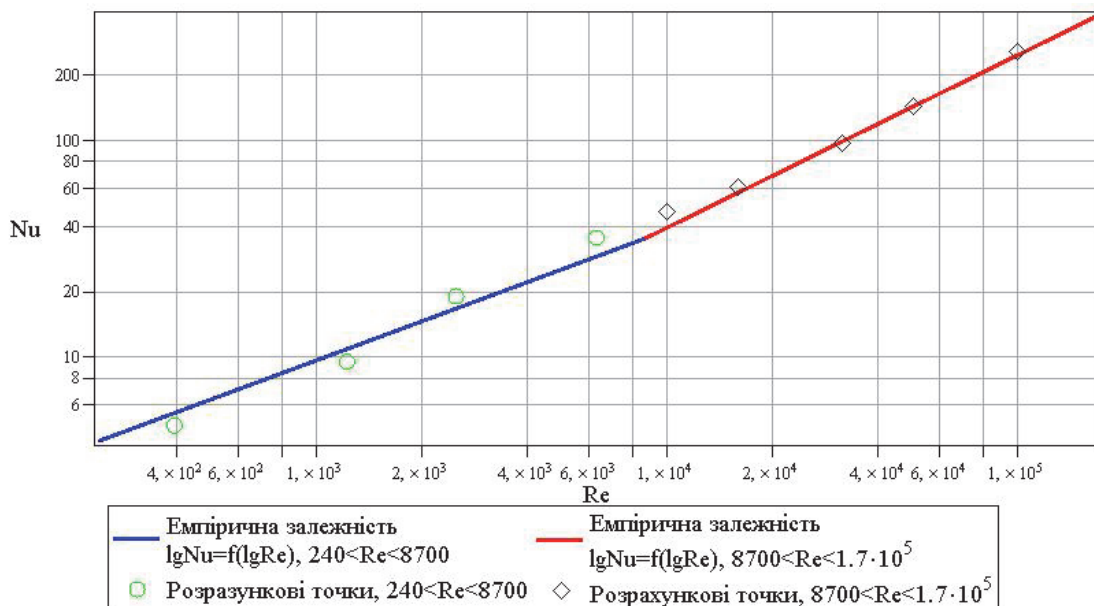


Рис. 10 – Порівняння результатів математичного моделювання теплообміну з фізичним експериментом

В інтервалі чисел Рейнольдса, що досліджувалися, ($Re = w2\delta/\nu$, w – швидкість потоку в зазорі під гребенем ущільнення, δ – відповідний зазор) від $4 \cdot 10^2$ до 10^5 , як у фізичному експерименті, так і в математичному моделюванні, в залежності $Nu = f(Re)$ було виявлено дві характерні ділянки. Вони напевно відповідали двом різним видам течії, які були у роботі [1] названі перехідним і турбулентним. Ці режими течії розділяє критичне число Рейнольдса, що приблизно дорівнює $Re_{кр} = 8700$.

Висновки

Зіставлення результатів математичного моделювання гідродинаміки, а також тепловіддачі потоку середовища у прямоточному та ступінчатому лабіринтових ущільненнях турбомашин з відповідним фізичним експериментом за допомогою комплексу прикладних програм показало адекватність використаного підходу і обґрунтувало можливість застосування його при розв'язанні конкретних інженерних задач в таких системах.

Список літератури: 1. *Гура, Л. А.* Исследование теплообмена в турбинных лабиринтовых уплотнениях [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Л. А. Гура. – Харьков, 1973. – 183 с. 2. *Шейнин, Е. И.* Экспериментальное исследование теплообмена в зоне концевых уплотнений газовых турбин [Текст] / Е. И. Шейнин // Энергомашиностроение. – 1961. – № 1. – С. 25–27. 3. *Швец, И. Т.* Теплообмен в лабиринтовых уплотнениях роторов турбин [Текст] / И. Т. Швец, Е. П. Дыбан, В. Ю. Хавин // Энергомашиностроение. – 1963. – № 12. – С. 8–11. 4. *Капинос, В. М.* Исследование теплообмена в лабиринтовых уплотнениях на статических моделях [Текст] / В. М. Капинос, Л. А. Гура // Теплоэнергетика. – 1970. – № 11. – С. 38–41. 5. *Кузнецов, А. Л.* Теплообмен в лабиринтовых уплотнениях газовых турбин [Текст] / А. Л. Кузнецов, О. А. Журавлев // Энергомашиностроение. – 1972. – № 5. – С. 10–12. 6. *Алехина, С. В.* Исследование процессов теплообмена на поверхностях ступенчатых уплотнений роторов паровых турбин [Текст] / С. В. Алехина, В. Н. Голощاپов, В. В. Портнов // Наука – Производству. – 2006. – № 5. – С. 121–125.

Bibliography (transliterated): 1. Gura, L. A. *Issledovanie teploobmena v turbinnnyh labirintovyh uplotnenijah.* Dis. ... kand. tehn. nauk. Kharkov, 1973. 2. Shejnin, E. I. "Jeksperimental'noe issledovanie teploobmena v zone koncevyh uplotnenij gazovyh turbin." *Jenergomashinostroenie* 1 (1961): 25–27. Print. 3. Shvec, I. T., E. P. Dyban and V. Ju. Havin. "Teploobmen v labirintovyh uplotnenijah rotorov turbin." *Jenergomashinostroenie* 12 (1963): 8–11. Print. 4. Kapinos, V. M., L. A. Gura. "Issledovanie teploobmena v labirintovyh uplotnenijah na staticheskikh modeljah." *Teplojenergetika* 11 (1970): 38–41. Print. 5. Kuznecov, A. L., O. A. Zhuravlev. "Teploobmen v labirintovyh uplotnenijah gazovyh turbin." *Jenergomashinostroenie* 5 (1972): 10–12. Print. 6. Aljohina, S. V., V. N. Goloshchapov and V. V. Portnov. "Issledovanie processov teploobmena na poverhnostjah stupenchatyh uplotnenij rotorov parovyh turbin." *Nauka – Proizvodstvu* 5 (2006): 121–125. Print.

Поступила (received) 16.01.2015