

УДК 532.516

Експериментальне дослідження стійкості течії у дискових гідромашинах космічних енергоустановок

В. І. Місюра, В. Ф. Прісняков

Дніпропетровський державний університет

Надійшла до редакції 20.04.98

У роботі досліджується режим переходу від ламінарної течії до турбулентної у зазорі між двома пласкими дисками, які обертаються навколо осі з однаковою швидкістю. Цей зазор є робочим елементом дискових гідромашин (насосів, компресорів, вентиляторів, турбін), які застосовуються в космічних енергетичних установках, а також в народному господарстві. За допомогою оптичних методів вперше визначені типи нестійкостей, які виникають у потоці. Одержано експериментальні залежності для визначення початку ламінарно-турбулентного переходу та його закінчення.

У системах життєзабезпечення і терморегулювання космічних станцій та у бортових енергетичних установках космічних літальних апаратів використовуються гідравлічні машини, до яких головними вимогами є тривала працездатність та надійність.

Головними агрегатами конструкції, від яких залежить виконання цих вимог, є обертові вузли: насос, турбіна, компресор, вентилятор. Це вони є джерелами вібрації, а вібрація у машинобудуванні в 70 % випадків веде до руйнування і поломки машин. Крім того, у космічних енергосистемах насоси працюють на рідинах, близьких до стану насичення, турбіни — на вологій парі. Тому перед інженерами стало завдання підібрати тип гідромашин, який задовольняє ці вимоги. Перспективними є дискові гідромашини тертя, запатентовані у 1913 р. [14]. Схему такої гідромашини приведено на рис. 1. При підведенні і відведенні рідини у напрямку *A* гідромашини працює як нагнітач, при підведенні і відведенні у напрямку *B* — як турбіна.

Перші дослідження [6, 8, 11] показали ряд позитивних якостей, які властиві дисковим гідромашинам: стійкість і безшумність роботи, добрі всмоктуючі властивості і незмінність характеристик при малих габаритах [3]. Підкреслюється також, що

найбільший практичний інтерес мають дискові гідромашини не з турбулентною, а з ламінарною течією рідини у зазорах між дисками. Це пояснюється тим, що у технічних пристроях, які забезпечують передачу енергії за допомогою дотичних сил, умовою ефективної передачі енергії є мала відносна швидкість між ведучою і веденою поверхнями. Тобто, умовою одержання високого ККД у дискових гідромашинах є вимога ламінарної течії в робочих зазорах [5]. Тому під час проектування таких машин потрібно знати, при якому співвідношенні геометричних та гідродинамічних параметрів між дисками реалізується ламінарний режим течії.

Більшість досліджень з визначення межі переходу від ламінарної течії до турбулентної в обертових системах присвячені вивченню течії рідини на вільній поверхні диска [1] або в міждисковому зазорі, коли один диск обертається, а другий — нерухомий [7]. Лише у роботі [12] за допомогою термоанемометра визначалась межа переходу від ламінарної течії до турбулентної у повітряному потоці від центра до периферії між двома обертовими дисками. Але в роботі детально не досліджувалась фізична картина процесів і рекомендується критичне число Рейнольда брати у межах

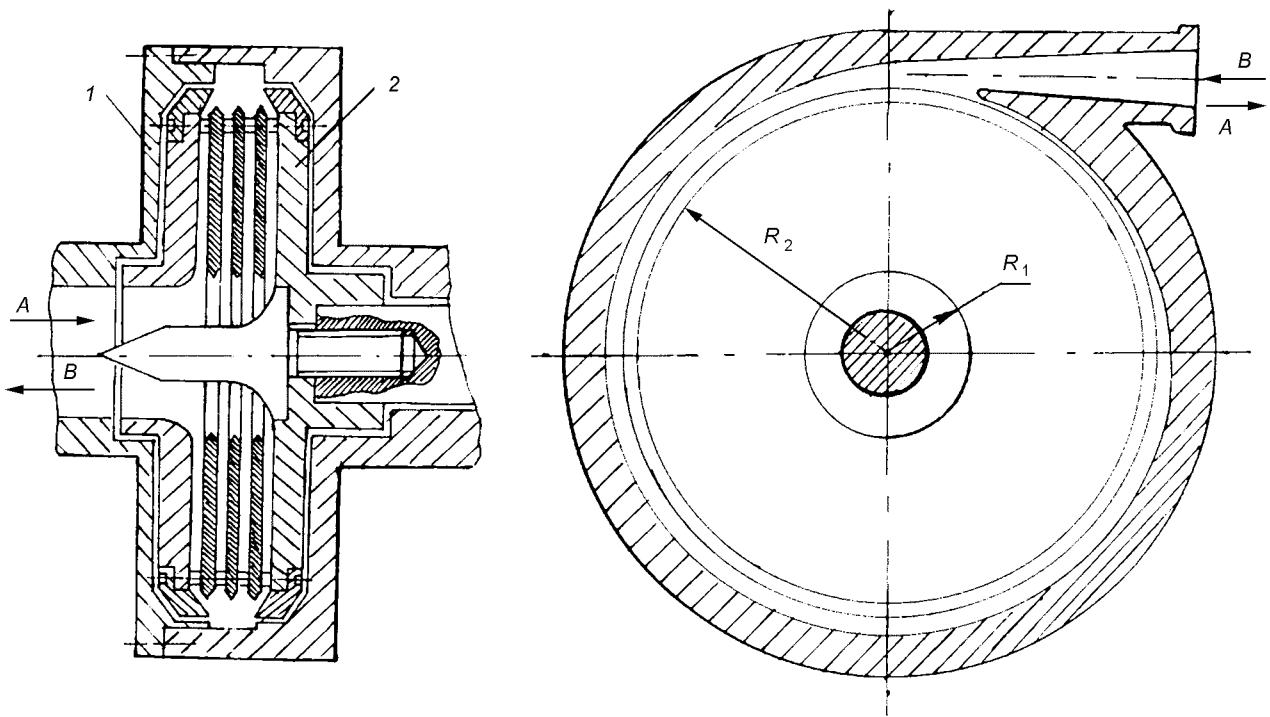


Рис. 1. Схема дискової гідромашини тертя: 1 — корпус; 2 — робоче колесо

$$Re_k = Rb\omega\nu^{-1} = 1200 \dots 2300,$$

де R — поточний радіус дисків, b — ширина зазору, ω — частота обертання дисків, ν — в'язкість. У роботі [10] висловлюється думка, що при течії у міждисківому зазорі зміна режимів відбувається при появі прогину на профілі радіальної складової швидкості W_r . У дослідженні [13] цей факт заперечується.

Крім того, у названих роботах вивчалась течія у міждисківому зазорі на режимах моделювання, тобто при параметрах, далеких від реальних, які мають місце в дискових насосах і турбінах; а також при відсутності спірального відводу (насос) або підводу (турбіна).

У зв'язку з цим виникла необхідність глибшого вивчення умов стійкості потоку у зазорі між двома обертовими дисками. При цьому важливо було не збурювати потік внесенням датчиків, що можливо лише при використанні оптичних засобів дослідження. Нами досліджувалась дводискова модель гідромашини, де один з дисків та кришка були прозорими (рис. 2). Рисунок відповідає відцентровій течії, тобто, спіральна камера 12 тут служить відводом — після витікання з неї у спеціальну ванну рідина додатковим насосом повертається на вхід. При доцентровій течії через спіральну камеру рідина підводиться у міждисківий зазор. Виходячи

з того, що структура потоку між дисками визначається параметром течії

$$\lambda = 0.5b\omega^{0.5}\nu^{-0.5}$$

та числом Рейнольдса Re , під час експериментів ми змінювали ширину зазору у межах $b = (0.5 \dots 5)10^{-3}$ м, в'язкість водогліцеринової суміші — $\nu = (0.1 \dots 10.8)10^{-4}$ м²/с, частоту обертання $\omega = 50 \dots 1000$ І/с. Це забезпечувало змінювання параметра течії у діапазоні $\lambda = 0.5 \dots 5$ та числа Рейнольдса $Re = 300 \dots 10^4$. Окрім цього, при виконанні експериментів змінними були відносний радіус

$$R = R_2/R_1 = 2 \dots 8$$

та коефіцієнт витрат

$$\varphi = W_r/\omega R = 0 \dots 0.1.$$

Дослідження стійкості міждисківого потоку для надійності проводилося паралельно трьома шляхами.

По-перше, спостерігався і фотографувався міждисківий потік, який уявляв суміш води і алюмінієвих частинок. Підсвічування виконувалось як сталим джерелом світла 3 так і стробоскопічною лампою 4.

По-друге, в потік за допомогою спеціальної державки через тонку медичну голку забарвлювача 6

вводилася струминка барвника. Слід, що утворювався, а також зміни його форми фіксувались за допомогою фотоапарата 5.

По-третє, потік чистої рідини між дисками спостерігався і фотографувався через виготовлений нами оптичний анемометр 7, що працює за принципом ультрамікроскопічного методу. У цьому методі використовується явище Тіндалля. Затемнений потік рідини освітлюється збоку так, що промені не потрапляють в око спостерігача, а розсіяне на мікроскопічних частинках світло спостерігається через мікроскоп. Для освітлення потоку ми використовували спосіб лазерного ножа: розтягнутий на циліндричній призмі 9 промінь оптичного квантового генератора ЛГ-36 підсвічував через прозору пробку 11 простір між дисками паралельно їх площині. При необхідності стробоскопічної підсвітки лазерний промінь направляли спочатку на дзеркальце, закріплене на валу, а потім через систему двох дзеркал — у міждисківий зазор [5]. Цей освітлений тонкий меридіональний шар рідини спостерігався через оптичний анемометр (мікроскоп «Мир-1М»), осі окуляра та об'єктива якого були перпендикулярними, а між ними — обертова дзеркальна призма. Зорієнтувавши певним способом прилад та надавши оберти призмі, можна визначити локальну швидкість потоку [4].

Для реєстрації коливань у потоці на виході з міждисківого зазору розміщувався однопітний термоанемометр 8 постійної температури (діаметр нитки $8 \cdot 10^{-6}$ м, довжина $3 \cdot 10^{-3}$ м), сигнал якого подавався на аналізатор спектру частот СК 4-72.

При вивченні течії від периферії до центра розташування датчика термоанемометра і голки візуалізатора міняли місцями.

Оскільки параметр $\omega = \omega_f / \omega$, де ω_f — частота обертання рідини у зазорі, у випадку дискових гідромашин набагато більший нуля, але менший одиниці, то у зазорі на дисках реалізується течія Екмана. Подібність течії у шарі Екмана і на дисках у зазорі полягає також у тому, що обидві течії — це течії в пограничному шарі, де важливу роль відіграють відцентрові сили. Згідно з роботою [1] при такій течії в обертовій рідині можна чекати виникнення нестійкостей двох типів — *A* і *B*. Тип *A* є результатом складної взаємодії сил Кориоліса та сил в'язкості. Тип *B* обумовлений появою перегину на епюрі швидкості потоку. Наявність радіальних витрат рідини також накладає особливості на умови виникнення нестійкості течії.

З цього випливає, що при малих значеннях коефіцієнта витрат φ у зазорі головним може бути конвективне перенесення збурень за рахунок колової швидкості з зони великих значень Re до зони з меншими значеннями. При великих значеннях φ головним у збудженні турбулентності може виявитись висока радіальна швидкість рідини W_r .

Оскільки дискові гідромашини найбільш ефективні при $\varphi = 0.01 \dots 0.04$ [5], то у зазорі між двома обертовими дисками при течії рідини від центра до периферії повинна домінувати конвективна модель нестійкості, але з урахуванням впливу деформації радіальної швидкості.

У наших дослідженнях течії від центра до пери-

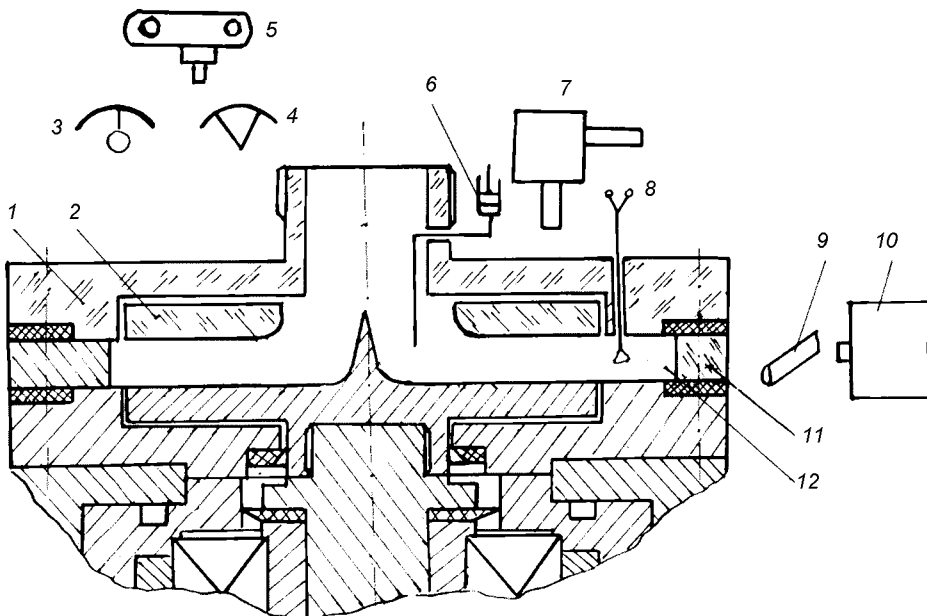


Рис. 2. Схема замірів: 1 — прозора кришка, 2 — прозорий диск, 3 — лампа сталого освітлення, 4 — стробоскопічна лампа, 5 — фотоапарат, 6 — забарвлювач, 7 — оптичний анемометр, 8 — термоанемометр, 9 — циліндрична оптична призма, 10 — оптичний квантовий генератор ЛГ-36, 11 — прозора пробка, 12 — спіральна камера

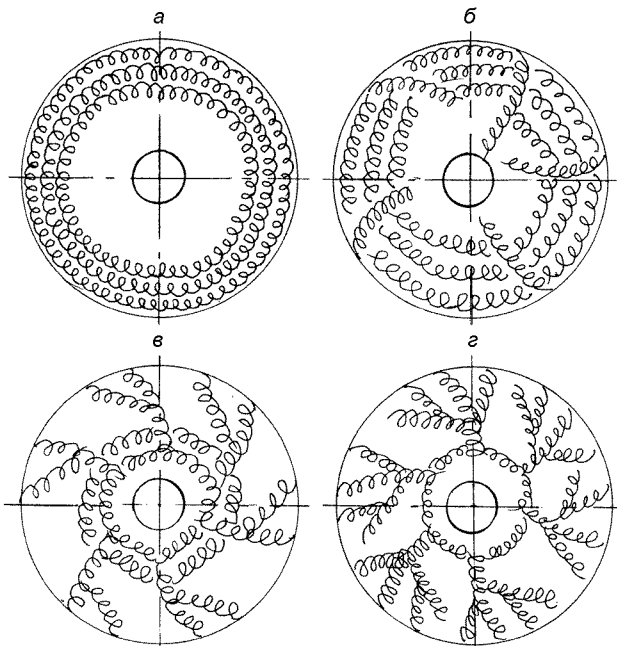


Рис. 3. Вихори нестійкості течії при значенні $\lambda = 1.4$: а — $Re = 1250$; б — $Re = 1400$; в — $Re = 1600$; г — $Re > 1600$

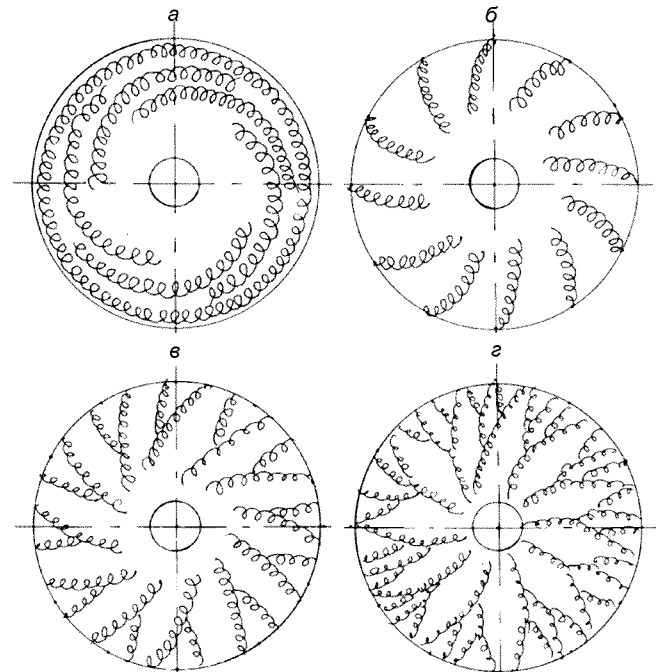


Рис. 4. Розвиток нестійкості течії при значенні $\lambda = 2.5$: а — $Re_1 = 1300$; б — $Re_1 = 1420$; в — $Re_1 = 1540$; г — $Re_1 > 1600$

ферії при незмінному значенні $\lambda = 1.4$ і підвищенні частоти обертання у потоці, візуалізованому алюмінієвими частинками, на периферії міждискового зазору, починаючи з деякого радіуса R , виникали практично концентричні стаціонарні вихори (рис. 3, а). По аналогії з течією на відкритому диску назвемо їх вихорами нестійкості типу А. При цьому кількість утворених вихорів залежала від λ , ω і R , але не перевищувала п'яти. Вихори спостерігались постійно, і неможливо було змінити їх число шляхом збурення течії зовнішнім джерелом. Навіть при великому збуренні стаціонарна картина течії самовідновлювалась. Збурення потоку здійснювалось за допомогою гідравлічного пульсатора, який ставився на вхідній магістралі.

Нами вперше виявлено, що подальша картина течії при збільшенні ω залежала від параметра течії λ . При $\lambda < 1.5$ підвищення частоти обертання приводило до виникнення одиночних спіральних вихорів A_1 , які перетинали під кутом близько 15° систему вихорів А та прокручувались у бік обертання з частотою $\omega_{A1} < \omega$ (рис. 3, б). При цьому шлейф введеного барвника, який мав спіралеподібну форму, у зоні утворення вихрової області ставав звивистим. Тому цей радіус R будемо вважати радіусом початку ламінарно-турбулентного переходу, і йому відповідає критичне число Рейнольдса Re_1 . У цьому випадку термоанемометр на

виході зазору фіксував коливання у вузькому спектрі частот 2...3 кГц. Поступово число вихорів A_1 збільшувалось, поблизу периферії дисків вони починали розширюватись, створюючи «хвости» — відбувалась інтерференція вихорів А і A_1 (рис. 3, в). Нарешті, хвости зникали, створюючи поблизу периферії дисків суцільний турбулізований потік (рис. 3, г). Датчик термоанемометра показував безладні коливання швидкості потоку на виході у широкому діапазоні частот: від 0.5 до 15 кГц. По мірі збільшення ω максимум спектра частот зміщувався в область більш високих значень. При цьому турбулентна зона поступово переміщувалась до центра дисків. Момент, коли весь міждисковий зазор заповнюється безладними вихорами, будемо вважати кінцем турбулізації — йому відповідає число Re_2 .

При збільшенні коефіцієнта витрат до $\varphi = 0.08$ шлейф барвника був деформований також і на вхідному радіусі дисків, а далі потік ламінаризувався на ділянці аж до вихрової зони внаслідок обертання. Про дію обертання на затухання турбулентності повідомляється також у роботі [2], де це явище пояснюється деформацією (дробленням і стисненням) турбулентних струменів.

Іншу картину течії ми спостерігали при $\lambda > 2$. У цьому випадку також у зазорі спочатку утворювались на короткий час близькі до концентричних

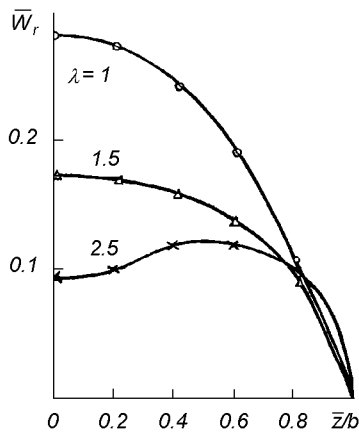


Рис. 5. Профіль радіальної швидкості при різних значеннях параметра течії

стаціонарні вихори типу *A* (рис. 4, *a*), подібні до тих, що спостерігав Кьюлер [12]. Але вони швидко перероджувались у систему спіральних вихорів з кутом $17^\circ \dots 19^\circ$ між дотичною до спіралі і дотичною до кола (рис. 4, *б*). На епюрі радіальної швидкості

$$W_r = W_{r1}/(\omega\nu)^{0.5},$$

визначеної за допомогою оптичного анемометра, видно, що при $\lambda = 2$ утворюється помітний перегин (рис. 5). Тобто, при такому поєднанні параметрів у міждисківому зазорі починає діяти механізм нестійкості типу *B*. Такі вихори також фіксували у своїх дослідях Грегорі та інші дослідники при течії рідини на окремому диску [9] і між нерухомим і обертовим дисками [7]. Кількість n утворених вихорів *B* у наших експериментах змінювалась у межах 20... 35 і описувалась співвідношенням

$$n = 0.6Re^{0.5}.$$

З підвищенням ω вихори *B* заповнювали все більшу частину міждисківому зазору, а поблизу зовнішнього діаметра перетворювались у «хвости» (рис. 4, *в*) (як і в попередньому випадку), що зникались, створюючи турбулентну зону на виході (рис. 4, *г*), яка поступово охоплювала весь міждисківий зазор.

При виконанні експериментів локальну турбулізацію у міждисківому зазорі ми оцінювали також, спостерігаючи за потоком через оптичний анемометр. При ламінарній течії мікрочастинки рідини у полі зору мікроскопа описували яскраві траєкторії. У турбулентному потоці вони спостерігались як безладні мерехтливі зірочки. Такий ефект пояснюється дуже малою глибиною зображення приладу, меншою за розмір поперечних турбулентних пульсацій у потоці. Використання такого способу визначення стійкості потоку цінне

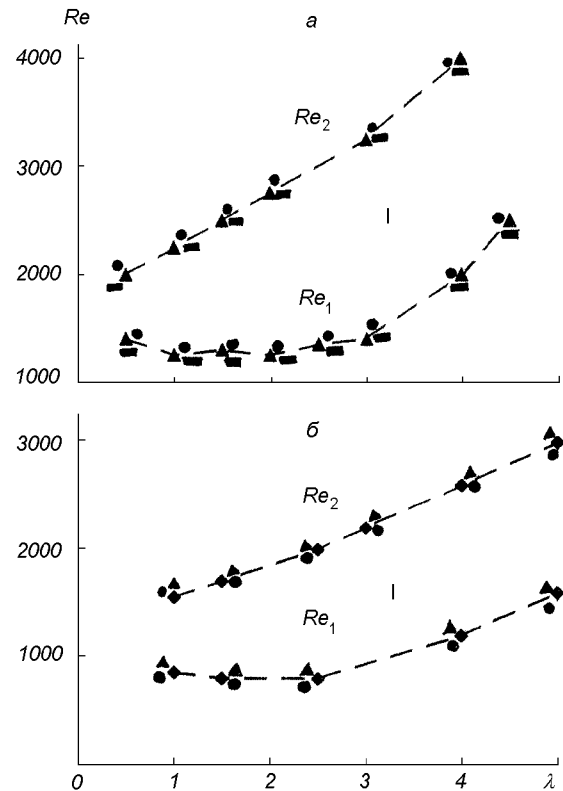


Рис. 6. Зона переходу від ламінарного режиму до турбулентного: *a* — при відцентровій течії, *б* — при доцентровій течії: трікутники, точки, квадратики — для $\varphi = 0.01, 0.02$ і 0.03 відповідно

тим, що дозволяє спостерігати перехід до турбулентності у будь-якому плоскому перерізі міждисківому зазору, при його яскравому освітленні. Такі досліді до цього ніким не проводились. Було виявлено, що турбулізація потоку починається з центральних шарів рідини і закінчується турбулізацією шарів, які прилягають до поверхні дисків.

Порівняння результатів з ламінарно-турбулентного переходу при течії від центра до периферії зазору, одержаних за допомогою оптичного анемометра, шлейфа барвника і візуалізації частинками, показало їх тотожність. Тому при вивченні стійкості течії від периферії до центра ми користувались головним чином вимірами оптичного анемометра.

Особливою рисою переходу від ламінарного режиму до турбулентного при течії рідини від периферії до центра (випадок дискової турбіни) була більш чітка межа початку переходу, яка знаходилась у вузькому діапазоні частот обертання ω . У випадку течії від центра до периферії дисків первинна нестационарність розвивається поступово в широкому інтервалі зміни ω — в цей період у полі

Значення коефіцієнтів виразу (1)

| Коефіцієнт | Re_1 | Re_2 |
|------------|------------|--------|
| | Від центра | |
| a | 125 | 116.7 |
| b | -375 | 0 |
| c | 1500 | 2133.2 |
| | До центра | |
| a | -4.17 | 116.7 |
| b | 387.5 | -450 |
| c | 1116.7 | 1133.3 |

зору оптичного анемометра чергувались «зірочки» і лінійні сліди від частинок.

Таким чином, при експериментальному дослідженні течії у робочому зазорі дискової гідромашини вперше виявлені нестійкості двох типів — A і B . На основі одержаних даних побудовані області переходу від ламінарного режиму до турбулентного при течії рідини від центра до периферії (рис. 6, a) і від периферії до центру (рис. 6, b). На цих рисунках нижня лінія відповідає початку ламінарно-турбулентного переходу, а верхня — завершенню турбулізації потоку у міждисковому зазорі. Ці лінії апроксимуються параболічними залежностями вигляду

$$Re = a\lambda^2 + b\lambda + c. \quad (1)$$

Значення постійних величин a , b і c приведено в таблиці.

Бачимо, що діапазон змінювання критичного числа Re дуже широкий. У найбільш цікавих з точки зору ефективності роботи дискової гідромашини діапазонах $\lambda = 1...2$ і $\varphi = 0.01...0.04$ критичне число Re , яке відповідає початку турбулізації для течії від центра до периферії, дорівнює 1000...1500, тобто межа початку переходу дещо «розмита». Закінчується ламінарно-турбулентний перехід у цьому випадку при $Re_2 = 2250...2600$.

При течії від периферії до центра зона нестійкості починається при $Re_2 = 800...850$, межа більш чітка і закінчується перехід швидше — при $Re_2 = 1700...1800$. Це пояснюється тим, що зони турбулентності мають здатність розповсюджуватись від зовнішнього діаметра дисків до внутрішнього, а наявність доцентрової течії допомагає більш швидкому переміщенню турбулентних пульсацій. У випадку, коли потік рідини направлений до периферії, радіальна течія перешкоджає перенесенню пульсацій до центра. Слід також підкреслити, що при $\lambda \leq 2$ перехідна зона I від ламінарної течії до турбулентної має тенденцію до скорочення і при $\lambda < 0.5$ спостерігається практично миттєвий ламінарно-турбулентний перехід.

Одержані експериментальні залежності дозволяють установити межу переходу від ламінарного режиму до турбулентного при течії в робочих зазорах дискових гідромашин і врахувати особливості цих режимів при розрахунках вентиляторів, компресорів і турбін на етапі проектування космічних енергетичних установок.

1. Гринспен Х. Теория вращающихся жидкостей. — Л.: Гидрометеоздат, 1975.—304 с.
2. Лунева Н. В. Влияние вращения на затухание турбулентности // Нелинейные задачи теории устойчивости: Материалы 7-й шк. семинара, Ин-т механики. — М., 1992.—38 с.
3. Мисюра В. И. О применении дисковых гидромашин трения в народном хозяйстве // Математическое моделирование в инженерных расчетах сложных систем: Сб. науч. тр. — Днепропетровск, ДГУ, 1997.—С. 208—215.
4. Мисюра В. И. Экспериментальное исследование течения несжимаемой жидкости между двумя вращающимися дисками // Изв. вузов. Энергетика.—1977.—№ 5.—С. 103—107.
5. Мисюра В. И., Овсянников Б. В., Присняков В. Ф. Дисковые насосы. — М.: Машиностроение, 1986.—112 с.
6. Райс В. Теоретическое и экспериментальное исследование многодисковых насосов и компрессоров // Энергетика.—1963.—№ 3.—С. 35—46.
7. Саньков П. И., Смирнов Е. Н. О влиянии радиального расхода на переход к турбулентному режиму течения в зазоре между вращающимися и неподвижными дисками // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа.—1986.—№ 5.—С. 175—179.
8. Шенберг С. П. Гидромеханика вязкой жидкости и гидравлические фрикционные машины. — К., 1915.—170 с.
9. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1974.—711 с.
10. Bojd K. E., Rice W. Laminar inward flow of an incompressible fluid between rotating disks with full peripheral admission // Trans. ASME.—1968.—90.—P. 229—237.
11. Gaede W. Die äussere Rebreng der Gaese und liniens Prinzip für Luftpumpen. Die Molekularluftpumpe // Physikalische Zeitschrift.—1912.—N 18(380).—S. 41—49.
12. Kohler M. Die Stromung durch das Spaltelement einer Reibungspumpe // Stromungmech. und Stromungsmasch.—1971.—N 9.—P. 24—45.
13. Pater L. L., Growth E., Rice W. Flow regime definition for flow between co-rotating disks // ASME Pap.—1973.—N 1.—WA/FE-9.—P. 29—34.
14. Pat. 1061206 USA. Turbine / N. Tesla.—Publ. 1913.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FLOW STABILITY IN DISK HYDRAULIC MACHINES OF SPACE POWER UNIT

V. L. Misyura and V. F. Prisnyakov

Laminar-turbulent transition regime in a slot between flat disks rotating around the axis at the same velocity is investigated. The slot is a working element of disk pumps, compressors, turbines, and fans recommended for space power units. Instabilities of various types which appear in the flow as well as the velocity distribution in the slot were determined by optical methods. Experimental relations lips hips which define the beginning of laminar-turbulent transition and its end were obtained.