

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
I N S T Y T U T M A S Z Y N P R Z E P Ł Y W O W Y C H

P R A C E
I N S T Y T U T U M A S Z Y N
P R Z E P Ł Y W O W Y C H

T R A N S A C T I O N S
O F T H E I N S T I T U T E O F F L U I D - F L O W M A C H I N E R Y

82

W A R S Z A W A - P O Z N A Ń 1982

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPLYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

RADA REDAKCYJNA – EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI
STEFAN PERYCZ · WŁODZIMIERZ PROSNAK
KAZIMIERZ STELLER · ROBERT SZEWAŁSKI (PRZEWODNICZĄCY · CHAIRMAN)
JÓZEF ŚMIGIELSKI

KOMITET REDAKCYJNY – EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER – REDAKTOR – EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA – EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Gen. Józefa Fiszerza 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1982

Printed in Poland

ISBN 83-01-03979-5

ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE – ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 340 + 90 egz.

Ark. wyd. 12 Ark. druk. 9,25

Pap. druk. sat. kl. V, 70 g 70 × 100 cm.

Nr zam. 577/122. W-6/523.

Oddano do składania 12 X 1981 r.

Podpisano do druku 18 V 1982 r.

Druk ukończono w maju 1982 r.

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

PIOTR DOERFFER

Gdańsk

Zmniejszenie intensywności fal uderzeniowych poprzez modyfikację kształtu krawędzi sływowej łopatki transsonicznej*

Praca zawiera analizę teoretyczną oraz wyniki obliczeń numerycznych naddźwiękowego sływu z krawędzi dwóch strumieni jednorodnych o różnych prędkościach. Do rozważań przyjęto model płynu idealnego.

Wykaz oznaczeń

H – grubość krawędzi sływu,
 k – wykładnik izentropy,
 M_1 – liczba Macha po stronie nadciśnieniowej,
 M_2 – liczba Macha po stronie podciśnieniowej,
 M_{red} – liczba Macha zredukowana,
 p_0 – ciśnienie spiętrzenia,
 p_1 – ciśnienie po stronie nadciśnieniowej, odniesione do ciśnienia spiętrzenia,
 p_2 – ciśnienie po stronie podciśnieniowej, odniesione do ciśnienia spiętrzenia,
 p_{red} – ciśnienie zredukowane, odniesione do ciśnienia spiętrzenia,
 p_b – ciśnienie bazowe, odniesione do ciśnienia spiętrzenia,

p_{bk} – ciśnienie bazowe określone według Korsta, odniesione do ciśnienia spiętrzenia,
 t – suma szerokości strumieni i grubości krawędzi,
 x_0 – długość profilu sływowego,
 η – sprawność przepływu,

$$\eta = \frac{\sum_i [(1 - \zeta_i) \times G_{i1}] + \sum_i [(1 - \zeta_i) \times G_{i2}]}{\sum_i G_{i1} + \sum_i G_{i2}},$$

G_i – wydatek masowy w rurce prądu,
 ζ_i – strata energetyczna na fali w rurce prądu.

Indeksy dotyczą:

- 1 – strony nadciśnieniowej,
- 2 – strony podciśnieniowej.

1. Wstęp

W kanale transsonicznym można wyróżnić następujące obszary o intensywnych stratach energetycznych: warstwa przyścienna, ślad aerodynamiczny i fale uderzeniowe. Straty na falach uderzeniowych, które stanowią przedmiot tej pracy rosną wraz ze wzrostem liczby Macha przed falą. Według danych literaturowych [1, 2], już przy prędkościach

* Praca wykonana w ramach problemu międzyresortowego MR.I.26, pt. „Podstawy projektowania maszyn i urządzeń energetycznych”, grupa tematyczna 02.

mniejszych od $M=2$ wartość strat na falach może przewyższać straty w warstwie przyściennej. Straty związane z falami uderzeniowymi są spowodowane:

- stratami energii na skoku,
- stratami w oderwaniach na profilach w miejscach padania fal uderzeniowych.

Celem przedstawionej w pracy analizy było zwiększenie sprawności przepływu w kanale naddźwiękowym przez osłabienie intensywności fal uderzeniowych. Cel ten osiągnięto przez modyfikację kształtu krawędzi spływowej.

2. Model przepływu

Na fotografii (rys. 1) [7] przedstawiono interferencyjny obraz przepływu transsonicznego przez palisadę. Jest to palisada profili wierzchołkowych nowoczesnej wysokoobciążonej łopatki ostatniego stopnia turbiny dużej mocy, która została zaprojektowana w japońskiej firmie Mitsubishi w 1977 r.



Rys. 1. Zdjęcie interferencyjne przepływu przez palisadę profili wierzchołkowych ostatniego stopnia turbiny dużej mocy [7]

Jak widać na fotografii, za krawędzią spływową łopatki powstają dwie fale uderzeniowe oraz ślad aerodynamiczny. W przekroju normalnym do profilu na wysokości krawędzi spływowej prędkość strumienia jest słabozmienna wzdłuż zaznaczonego na rysunku odcinka. Na wylocie z palisady, po stronie nadciśnieniowej łopatki, występuje silna ekspansja zogniskowana na samej krawędzi spływowej. Z tego wynika, że prędkości strumienia po obu stronach łopatki są różne. Związana z tym różnica ciśnień statycznych powoduje odchylenie strumienia za łopatką.

Tak więc do analizy obrazu fal uderzeniowych za krawędzią spływową uzasadnione wydaje się przyjęcie jednorodnych strumieni, o różnych prędkościach naddźwiękowych po obu stronach łopatki.

Zainteresowanie obliczeniową metodą określenia parametrów przepływu w obszarze spływu z krawędzi jest bardzo duże. Jednakże złożoność tego problemu, wynikająca z silnego wpływu lepkości na przepływ w tym przypadku oraz sąsiadujące ze sobą obszary nad- i poddźwiękowe spowodowały, że jest to nadal otwarty problem. Do tej pory używano rozwiązania przepływu symetrycznego przy założeniu jednakowych prędkości strumieni oraz laminarnych warstw przyściennych.

Ponieważ takie założenia nie są adekwatne do sytuacji przy spływie z łopatki, w pracy przyjęto model płynu idealnego. Jest to duże uproszczenie, prowadzące do pominięcia warstw przyściennych i śladu aerodynamicznego. Jednakże model ten umożliwia stosunkowo prostą analizę położenia powstających fal uderzeniowych oraz związanych z nimi strat. W obliczeniach stosowano metodę charakterystyk.

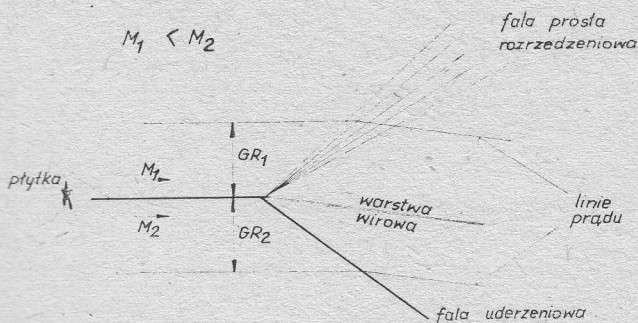
Stosując taki model obliczeniowy konieczna jest znajomość punktu oderwania strumienia na krawędzi spływu. To narzuca przyjęcie, jako punkt wyjścia do rozważań, krawędzi prostokątnej, na której oderwania występują na narożach. Jak wykazują badania eksperymentalne [8] kształt śladu za ogólnie stosowaną krawędzią zaokrągloną oraz za krawędzią prostokątną jest niemal identyczny.

3. Metody osłabienia intensywności fal uderzeniowych

Przy spływie z krawędzi istnieją dwa czynniki generujące fale uderzeniowe:

- różnica ciśnień spływających strumieni,
- skończona grubość krawędzi.

Różnica ciśnień strumieni spływających jest spowodowana kształtem kanału łopatkowego i jest źródłem siły nośnej. Osłabienie intensywności fal poprzez zmniejszenie różnicy ciśnień strumieni spływających wiązałoby się ze zmniejszeniem siły nośnej profilu.



Rys. 2. Układ fal przy naddźwiękowym spływie z nieskończenie cienkiej płytki

Osłabienie fal uderzeniowych polegać więc musi na zmniejszeniu efektu skończonej grubości krawędzi spływowej. Porównawczy przepływ, który umożliwi ocenę efektów podjętych prób zmniejszenia intensywności fal uderzeniowych, stanowi spływ z nieskończenie cienkiej płytki (rys. 2). W takim przepływie w ogóle nie występuje efekt skończonej

grubości krawędzi. Charakteryzuje się on występowaniem prostej fali rozrzedzeniowej po stronie nadciśnieniowej oraz skośnej fali uderzeniowej po stronie podciśnieniowej, Ponieważ w tym przypadku intensywność fali uderzeniowej jest stała na całej długości, sumaryczna sprawność przepływu wyraża się zależnością

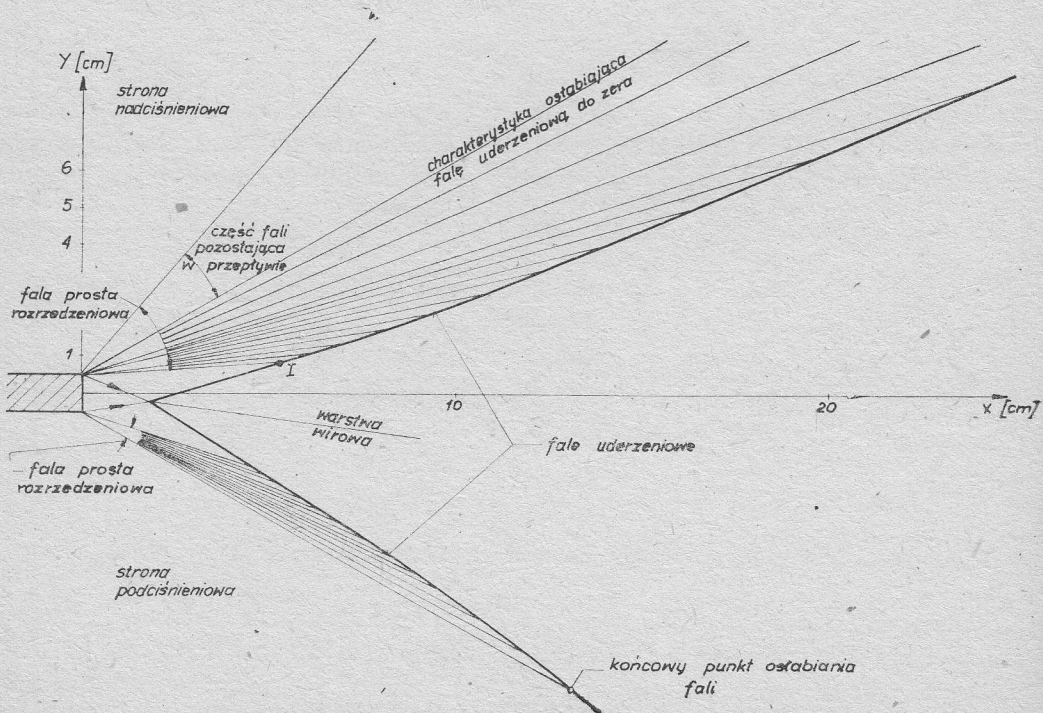
$$\eta = \frac{G_1 + (1 - \zeta_2) G_2}{G_1 + G_2} = 1 - \frac{\zeta_2}{\frac{G_1}{G_2} + 1},$$

a więc nie zależy od bezwzględnych szerokości strumieni spływających tylko od ich stosunku.

Obraz spływu z krawędzi o skończonej grubości ma bardziej skomplikowany charakter i w ramach modelu płynu idealnego można go przedstawić jak na rysunku 3. Bezpośrednio za krawędzią znajduje się obszar zastoju, który jest wyznaczony przez linie prądu spływających strumieni. Ich odchylenie zależy od ciśnienia bazowego panującego w tym obszarze. Ciśnienie to określano na podstawie publikacji Korsta [4], który podał zależność $p_b/p_{red} = f(M_{red})$ dla $k=1,4$, gdzie

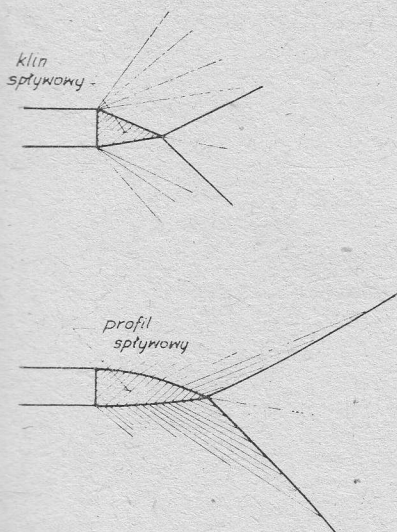
$$p_{red} = f(M_{red}), \quad M_{red} = f(M_1, M_2).$$

Na narożach krawędzi powstają proste fale rozrzedzeniowe, a z wierzchołka obszaru spływowego biorą początek fale uderzeniowe. Po stronie nadciśnieniowej fala rozrzedzeniowa, począwszy od punktu *I*, osłabia falę uderzeniową aż do jej całkowitego zaniku.

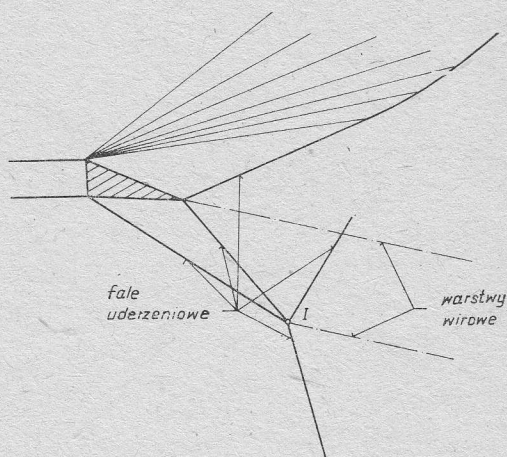


Rys. 3. Układ fal przy naddźwiękowym spływie z płytki

Dalej w przepływie rozprzestrzenia się tylko pozostała część fali rozrzedzeniowej. Istnienie fali uderzeniowej po stronie nadciśnieniowej jest spowodowane wyłącznie skończoną grubością krawędzi spływu. Po stronie podciśnieniowej fala uderzeniowa jest osłabiona tylko na pewnym odcinku.



Rys. 4. Rodzaje kształtów krawędzi spływowych



Rys. 5. Układ fal za krawędzią w kształcie klina dla założonego $p_b > p_2$

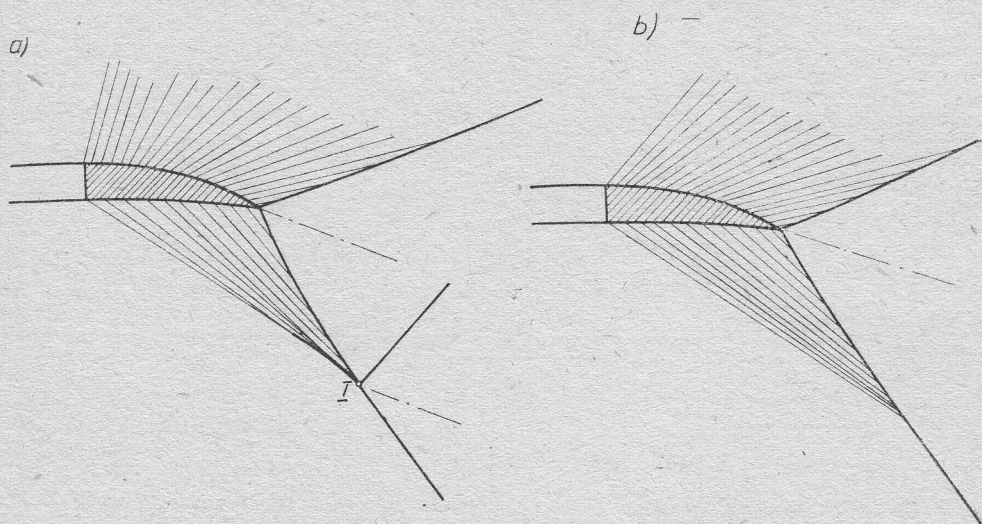
Fala uderzeniowa, która dalej rozprzestrzenia się w przepływie po stronie podciśnieniowej oraz pozostała część fali rozrzedzeniowej w sąsiednim strumieniu odpowiadają falom powstającym przy spływie z cienkiej płytki. Pomiedzy charakterystyką osłabiającą falę uderzeniową do zera po stronie nadciśnieniowej a ostatnią charakterystyką osłabiającą falę uderzeniową po stronie podciśnieniowej zawarty jest więc obszar wpływu skończonej grubości krawędzi spływowej.

Intensywność fal uderzeniowych jest bezpośrednio związana z zakresem ekspansji na narożach krawędzi. Jeżeli zostanie zmniejszony ten zakres, to zmaleje także intensywność fal. Ten efekt można uzyskać przez modyfikację kształtu krawędzi spływowej, polegającą na wstawieniu w miejsce obszaru spływu klina o długości większej niż długość tego obszaru. Wybór odpowiedniego kształtu klina jest bardzo ważnym elementem. Optymalny jest klin, na którym spływ będzie symetryczny [6], tak jak to ma miejsce w przypadku obszaru zastoju. Kształt klina obliczano na podstawie przyjętego ciśnienia bazowego. Im dłuższy klin miał być zastosowany, tym wyższe ciśnienie bazowe należało przyjąć.

W tego typu przepływie występują początkowe odcinki fal uderzeniowych o stałej intensywności. Właśnie na tych odcinkach intensywność fali uderzeniowej jest maksymalna. Zlikwidowanie ich stanowi dalszą możliwość zwiększenia sprawności przepływu. Zwiększenie sprawności przepływu osiągnięto przez modyfikację kształtu krawędzi spływowej, polegającą na zastąpieniu klinów spływowych profilami spływowymi o zakrzy-

wionych ściankach (rys. 4). Przy tego typu geometrii fala rozrzedzeniowa osłabia falę uderzeniową już od samego początku.

Stosując coraz to dłuższe profile lub kliny sphywowe, co jest jednoznaczne z przyjmowaniem coraz to wyższych ciśnień bazowych, aż do wartości równej ciśnieniu po stronie podciśnieniowej (nazwijmy je p_2) zachowany zostaje obraz sphywu z ekspansjami w obu strumieniach. Jeżeli ciśnienie bazowe przekroczy wartość p_2 obraz przepływu po stronie podciśnieniowej ulegnie zmianie.



Rys. 6. Układy fal za krawędzią o zaokrąglonych ściankach dla założonego $p_b > p_2$

Jeżeli zastosuje się klin (rys. 5) wówczas powstaną dwie fale uderzeniowe, które przecinają się w punkcie I i generują nowe dwie fale uderzeniowe oraz warstwę wirową.

Jeżeli zastosuje się profil sphywowy o zakrzywionych ściankach (rys. 6) wówczas powstaje prosta fala zęszczeniowa oraz sphywowa fala uderzeniowa. Wtedy możliwe są dwa przypadki:

— prosta fala zęszczeniowa wzmacnia falę uderzeniową oraz sama formuje falę uderzeniową i obie fale przecinają się (rys. 6a),

— prosta fala zęszczeniowa tylko wzmacnia intensywność sphywowej fali uderzeniowej (rys. 6b).

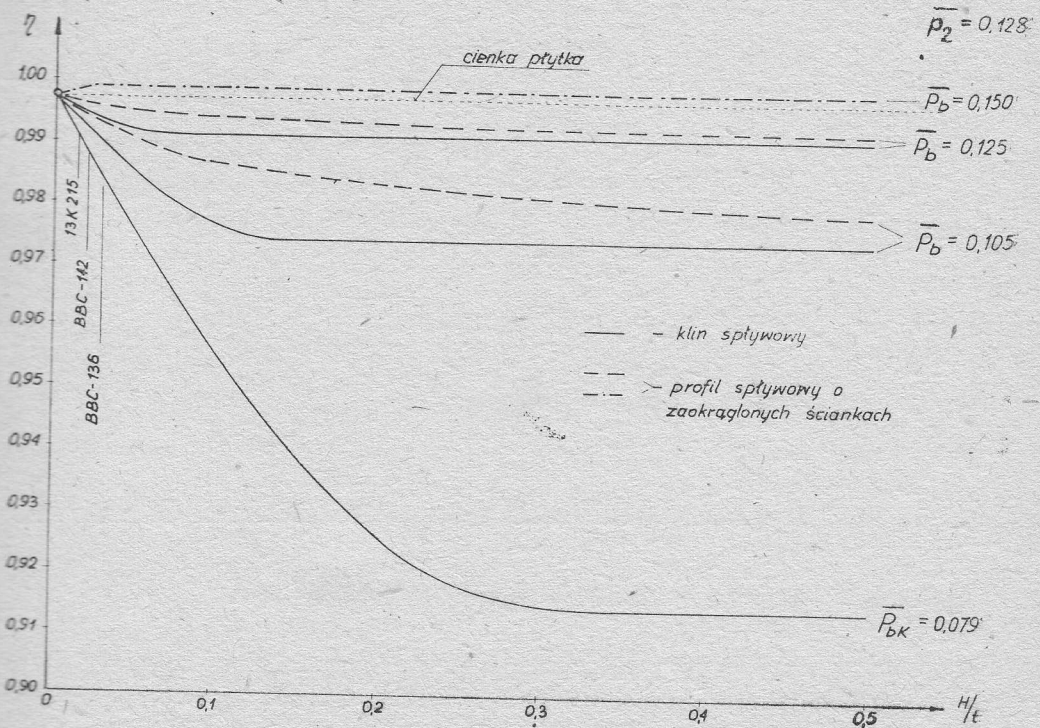
4. Wyniki obliczeń

Prędkości strumieni sphywających z krawędzi przyjęto: $M_1 = 1,5$ i $M_2 = 2,0$, na podstawie danych literaturowych [9, 10, 11].

Oprócz założeń, które zaznaczono przy omawianiu modelu przepływu (rozd. 2), przyjęto jednakową szerokość obu strumieni oraz kształt ścianek profili sphywowych odpowiadający odcinkom okręgów.

Na wykresie (rys. 7) przedstawiono zależność $\eta = f(H/t)$. Na rysunku podano ciśnienia bazowe p_b odpowiadające poszczególnym klinom lub profilom sphywowym oraz ciśnienia

nie po stronie podciśnieniowej p_2 dla tego przykładu obliczeniowego. Pozioma prosta kreskowana określa sprawność splywu z cienkiej plytki, a wiec uwzględnia tylko straty wynikające z różnicy ciśnień strumieni. Dążenie parametru $H/t \rightarrow 0$ oznacza zbliżanie się do właśnie takiego przypadku przepływu i dlatego wszystkie krzywe sprawności biorą początek ze wspólnego punktu o sprawności splywu z cienkiej plytki. Maksymalna wartość parametru wynosi $H/t=1$. Na wykresie przedstawiono zakres zmian tylko do $H/t=0,5$, ponieważ już przy tej wartości krzywe mają bardzo płaski przebieg.



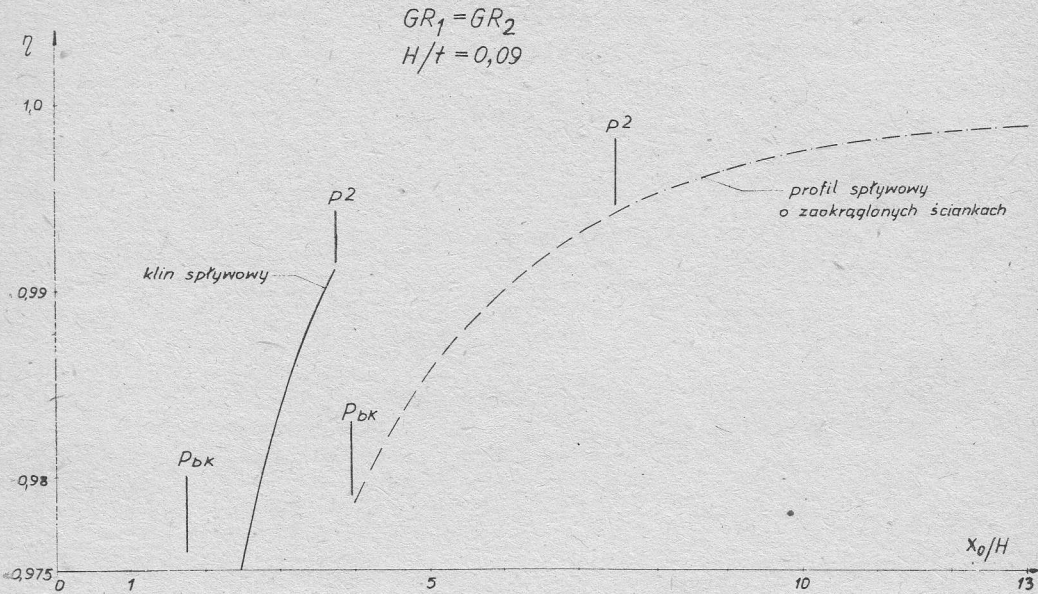
Rys. 7. Wykres funkcji $\eta=f(H/t)$ dla różnych kształtów krawędzi splywowych

Najniższa krzywa ciągła odpowiada ciśnieniu bazowemu, występującemu w obszarze zastoju za prostokątną krawędzią splywową jak na rysunku 3. Początkowo spadek sprawności wynikający z zawężenia obszaru wokół krawędzi (H/t rośnie) jest bardzo silny. Następnie krzywa staje się płaska i osiąga stałą wartość sprawności. Ta stała wartość sprawności jest związana z występowaniem początkowych odcinków fali uderzeniowej o stałej intensywności. Na wykresie zaznaczono wartość parametrów H/t dla profili transsonicznych BBC-136, BBC-142 oraz profilu wierzchołkowego ostatniego stopnia turbiny 13K215. Straty na falach uderzeniowych dla tych parametrów H/t wynoszą 1 - 2%. Przy takich wartościach parametru H/t straty związane z efektem skończonej grubości krawędzi są wielokrotnie większe od strat spowodowanych różnicą ciśnień splywających strumieni.

Wstawienie w miejsce obszaru zastoju coraz to dłuższych klinów, czyli stosowanie coraz większych ciśnień bazowych, prowadzi do bardzo wyraźnego podniesienia spraw-

ności przepływu. Przy ciśnieniu bazowym bliskim wartości p_2/p_0 (dla $p_b/p_0=0,125$) krzywa sprawności leży bardzo blisko sprawności przepływu przy spływie z cienkiej płytki.

Zastąpienie klinów spływowych profilami spływowymi o zaokrąglonych ściankach prowadzi do dalszego podniesienia sprawności przepływu. Ważny jest tutaj fakt, że przy małych wartościach parametru H/t sprawności maleją znacznie wolniej niż w przypadku klinów.



Rys. 8. Wykres funkcji $\eta=f(x_0/H)$ dla klina i profilu spływowego przy $H/t=0,09$

Obliczenia przepływów przy ciśnieniach bazowych powyżej wartości p_2 wykonano tylko dla profili spływowych o zaokrąglonych ściankach. Okazało się, że przy przyjętym kształcie ścianek następuje przepływ przedstawiony na rysunku 6 b. Przy odpowiednio wysokich ciśnieniach p_b sprawność przepływu przekracza sprawność przepływu przy spływie z cienkiej płytki. Świadczy o tym krzywa dla $p_b/p_0=0,150$. Przy tego typu modyfikacji istotnym elementem jest długość profilu spływowego, gdyż decyduje ona o praktyczności rozwiązania. Na rysunku 8 przedstawiono zależność $\eta=f(x_0/H)$.

W przypadku profili spływowych o zaokrąglonych ściankach, którym odpowiadają ciśnienia bazowe mniejsze od p_2 , istnieje silny wpływ długości profilu na sprawność przepływu. Przy ciśnieniach p_b większych od p_2 wpływ długości profilu na sprawność wyraźnie maleje. Przy zastosowaniu klinów spływowych wpływ długości klina na sprawność jest znacznie większy niż przy profilach o zaokrąglonych ściankach, a długość klina jest mniejsza od długości profilu spływowego.

W przedstawionym przykładzie obliczeniowym długość odniesiona obszaru zastoju wynosi około 1,8, natomiast klin spływowy o ciśnieniu bazowym $p_b=p_2$ ma długość odniesioną około 3,6, czyli tylko dwukrotnie większą. Profile spływowe natomiast są około dwukrotnie dłuższe od klinów, przy tych samych ciśnieniach bazowych.

5. Wnioski

1. Przy H/t odpowiadającym palisadom transsonicznym efekt skończonej grubości krawędzi spływowej ma wielokrotnie większy wpływ na straty niż efekt różnicy ciśnienia po obu stronach łopatki.

2. Zmniejszenie efektu skończonej grubości krawędzi można uzyskać przez modyfikację jej kształtu:

a) zastosowanie klinów spływowych umożliwia osłabienie fal poprzez zmniejszenie ekspansji na narożach krawędzi,

b) wprowadzenie zakrzywionych ścian profilu spływowego dodatkowo likwiduje początkowe odcinki fal o maksymalnej intensywności.

3. Zastosowanie zmodyfikowanych krawędzi spływowych powoduje bardzo wyraźne zmniejszenie efektu skończonej grubości krawędzi, a nawet doprowadzić może do sprawności wyższych od sprawności spływu z cienkiej płytki.

Rzeczywista wartość przeprowadzonej tu analizy zależy od pominiętego, istotnego wpływu lepkości na obraz spływu z krawędzi łopatki. Jednak model przepływu idealnego poddaje się analizie teoretycznej stosunkowo prosto, dając pewien pogląd na obraz przepływu.

Wyniki przeprowadzonej analizy sugerują kształty sprawniejszych krawędzi spływowych do eksperymentalnej weryfikacji.

Praca wpłynęła do Redakcji w czerwcu 1981 r.

Literatura

- [1] E. M. Curtis, M. F. Hutton, D. H. Wilkinson, *Theoretical and Experimental Work on Losses in 2-D Turbine Cascades with Supersonic Outlet Flow*. Proceedings of the Conference on Heat and Fluid Flow in Steam and Gas Turbine Plant in Warwick, 1973.
- [2] N. Scholz, *A Survey of the Advances in the Treatment of the Flow in Cascades*. Proceedings of the Conference on Internal Aerodynamics in Cambridge, July 1967.
- [3] J. T. Ohrenberger, E. Baum, *A Theoretical Model of the Near Wake of a Slender Body in Supersonic Flow*. AIAA Journal, Vol. 10, No 9, September 1972.
- [4] H. H. Korst, *A Theory for Base Pressure in Transonic and Supersonic Flow*. Journal of Applied Mechanics, December 1956.
- [5] W. Prosnak, *Mechanika płynów*, t. II. PWN, Warszawa 1971.
- [6] P. Doerffer, *Fale uderzeniowe za obszarem spływu z łopatki zastąpionym klinem o sztywnych ściankach*. Zeszyty Naukowe IMP PAN nr 32/900/78.
- [7] Takehiko Nagayama, Takeshi Adachi, Yasumichi Hayashi, Etsuko Miyata, *Numerical Analysis of Flow Through Turbine Cascades by the Modified FLIC Method*. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, vol. 15, no. 3, 1978.
- [8] M. E. Dejcz, G. A. Sałtanow, K. G. Gieorgijew, *Ekspierimentalnoje issledowanije charakteristik bliźniewo sleda za płoskoj plastinkoj*. Energietika 11, 1978.
- [9] C. Sieverding, M. Decuyper, O. Amana, J. Colpin, *The Base Pressure Problem in Transonic Turbine Cascades, Part I – Cascade Tests, Part II – Model Tests*, von Karman Institute for Fluid Dynamics, February 1976.
- [10] G. A. Sokolovsky, V. J. Gnesin, *A numerical procedure of time-marching for a transonic gas flow at the turbomachine stage on the stream surface in the layer with variable thickness*. Proceedings of the VII-th Conference on Steam Turbines of Large Output, Plzeň, May 15 to 17, 1979.
- [11] R. Puzyrewski, S. Krzeczkowski, *Badanie 8 profili wierzchołkowych ostatnich stopni*. Oprac. zewn. IMP PAN nr rej. 47/1975.

Уменьшение интенсивности ударных волн путем модификации формы выходной кромки околосзвуковой лопатки

Резюме

Целью работы было уменьшение интенсивности ударных волн. Это достигнуто путем ослабления эффекта конечной толщины выходной кромки. Применены модифицированные формы кромки. Этот метод действия позволяет даже полностью компенсировать эффект конечной толщины выходной кромки.

Работа содержит теоретический анализ и результаты численных расчетов сверхзвукового истечения из кромки двух однородных потоков характеризующихся различными скоростями. В рассуждениях принята модель идеального газа.

Reduction of the Shock Wave Intensity by Modification of the Trailing Edge of a Transonic Blade

Summary

The aim of the work presented was to decrease the intensity of shock waves by reduction of the effect of the trailing edge finite thickness. Modified shapes of the edge were adopted. This made it possible to even entirely compensate for the effect mentioned.

The paper contains a theoretical analysis and results of numerical calculations for supersonic flow of two homogeneous streams flowing off the trailing edge at different velocities. The model of ideal gas has been assumed for the analysis.