

А. П. УСАТЫЙ, Т. А. ФАМ

СОЗДАНИЕ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОПЛОВЫХ РЕШЕТОК С ПОВОРОТНЫМИ ДИАФРАГМАМИ

В результате проведения и обработки результатов численных исследований была получена аппроксимационная зависимость для оценки квадратов коэффициентов скорости сопловых решеток с поворотными диафрагмами. Полученная зависимость позволяет оценить влияние геометрических и режимных параметров решеток на их эффективность. Для получения такой зависимости с помощью насыщенного плана Рехтшафнера и дополнительного плана, повышающего точность и адекватность зависимости, был спланирован вычислительный эксперимент. В соответствии с разработанными планами эксперимента был спроектирован ряд сопловых решеток с различной геометрией и степенью относительного смещения их неподвижной и поворотной частей, а также построены их расчетные области. С помощью комплекса CFD были проведены соответствующие расчетные исследования по оценке влияния геометрических и режимных параметров сопловых решеток с поворотными диафрагмами на их эффективность. Полученные в процессе численных исследований квадраты коэффициентов скорости сопловых решеток с поворотными диафрагмами были использованы в процессе соответствующей обработки и создания аналитической зависимости для оценки эффективности таких решеток. Полученная зависимость предназначена для решения задач синтеза и анализа теплофикационных турбин с регулируемым отбором пара.

Ключевые слова: поворотная диафрагма, планирование вычислительного эксперимента, CFD, теплофикационные турбины.

О. П. УСАТИЙ, Т. А. ФАМ

СТВОРЕННЯ ІНЖЕНЕРНОЇ МЕТОДИКИ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ СОПЛОВИХ РЕШІТОК З ПОВОРОТНИМ ДІАФРАГМАМИ

В результаті проведення та обробки результатів чисельних досліджень була отримана апроксимаційна залежність для оцінки квадратів коефіцієнтів швидкості соплових решіток з поворотними діафрагмами. Отримана залежність дозволяє оцінити вплив геометричних і режимних параметрів решіток на їх ефективність. Для отримання такої залежності за допомогою насиченого плану Рехтшафнера і додаткового плану, що підвищує точність і адекватність залежності, був спланований обчислювальний експеримент. Відповідно до розроблених планів експерименту був спроектований ряд соплових решіток з різною геометрією і ступенем відносного зміщення їх нерухомою і поворотною частин, а також побудовані їх розрахункові області. За допомогою комплексу CFD були проведені відповідні розрахункові дослідження з оцінки впливу геометричних і режимних параметрів соплових решіток з поворотними діафрагмами на їх ефективність. Отримані в процесі чисельних досліджень квадрати коефіцієнтів швидкості соплових решіток з поворотними діафрагмами були використані в процесі відповідної обробки і створення аналітичної залежності для оцінки ефективності таких решіток. Отримана залежність призначена для вирішення завдань синтезу та аналізу теплофікаційних турбін з регульованими відборами пара.

Ключові слова: Поворотна діафрагма, планування обчислювального експерименту, CFD, теплофікаційні турбіни.

A. USATY, T. PHAM

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE SOCKET LATCHES BY TURN-LINK DIAPHRAGMS USING THE CFD-PACKET

As a result of conducting and processing the results of numerical studies, an analytical dependence was obtained to estimate the squares of the velocity coefficients of the nozzle arrays with Rotating diaphragms. The obtained dependence makes it possible to estimate the effect of the geometric and regime parameters of the gratings on their efficiency. To obtain such a dependence using the rich Rechtshafner plan and an additional plan that increases the accuracy and adequacy of the dependence, a computational experiment was planned. In accordance with the developed experiment plans, a number of nozzle arrays with different geometries and the relative displacement of their fixed and Rotating parts were designed and their calculated areas were constructed. With the help of complex CFD, the corresponding computational studies were carried out to evaluate the effect of geometric and regime parameters of nozzle arrays with Rotating diaphragms on their effectiveness. The squares of the velocity coefficients of the nozzle arrays with Rotating diaphragms obtained in the course of numerical studies were used in the process of appropriate processing and the creation of an analytic dependence to evaluate the effectiveness of such gratings. The results of numerical studies, the form of the analytical dependence and the graphs of the influence of geometric and regime parameters on the squares of the speed coefficients of the nozzle arrays with Rotating diaphragms are presented. The obtained dependence is intended for solving problems of synthesis and analysis of heating turbines with adjustable steam samplings.

Key word: Rotating diaphragm, DOE, CFD, heating turbines.

Введение

В большинстве теплофикационных турбин расход пара и параметры теплофикационного отбора регулируются при помощи поворотных диафрагм (ПД). Одной из проблем теплового расчета турбин с регулируемым отбором пара является отсутствие достоверных и универсальных методов, по оценке эффективности сопловых решеток с регулируемым поворотными диафрагмами раз-

личных конструкций. Данный факт не позволяет напрямую использовать известные методы теплового расчета конденсационных турбин, хорошо зарекомендовавшие себя при решении задач анализа и синтеза оптимальных проточных частей [1].

В статье приведена аппроксимационная зависимость, предназначенная для оценки эффективности сопловых решеток с регулируемым поворотными диафрагмами различных конструкций. В процессе ее создания использовались методы тео-

рии планирования вычислительного эксперимента, метод повышения точности и адекватности зависимостей, получаемых в результате обработки данных вычислительного эксперимента, современный *CFD*-решатель. Проведены верификационные расчеты и сравнение результатов расчета с данными экспериментальных исследований. Отработан алгоритм построения каналов сопловых решеток с поворотными диафрагмами. Проведен анализ результатов, полученных в процессе выполнения настоящей работы.

Цель работы

Целью настоящей работы является создание простой аналитической зависимости для оценки эффективности сопловых решеток с поворотными диафрагмами, как функции ряда геометрических и режимных параметров. Данная зависимость предназначена для использования в инженерных расчетах и математических моделях, связанных с моделированием термогазодинамических процессов в теплофикационных турбинах с регулируемым отбором пара.

1 Математическая модель течения и построение расчетной области

В численном эксперименте для оценки эффективности сопловых решеток с поворотными диафрагмами использован программный *CFD*-комплекс, обеспечивающий интегрирование уравнений Навье-Стокса на основе неявной разностной *TVD* схемы в 2-го порядка точности, позволяющий эффективно распараллеливать вычислительный процесс для многопроцессорных платформ. В связи с этим расчетная область была разделена на две части: часть 1, жестко связанная с поворотной диафрагмой и часть 2, соответствующая неподвижной части канала сопловой решетки (рис. 1). Для того, чтобы провести расчет течения в канале сопловой решетки с поворотной диафрагмой, необходимо на базе созданных конечно-элементных (КЭ) моделей [2–5] первого и второго участков создать расчетную модель решетки. Для этого необходимо специальным образом соединить расчетную область участка 1 и расчетную область участка 2, задать соответствующие параметры расчета (свойства рабочего тела, граничные условия и т.д.).

Известно, что получение достоверных результатов двумерного расчета напрямую зависит от построения качественной сетки. Получение такой сетки является весьма сложной задачей, так как исследуемый объект, в силу своих конструктивных особенностей, имеет сложную геометрию.

В ряде исследований [6–8] сказано, что длины входного A и выходного участков B (рис. 2)

незначительно влияют на результаты расчетов, однако, они оказывают существенное влияние на уровень используемых вычислительных ресурсов и стоимость расчетных исследований. Кроме этого, известно [6], что параметры потока меняются на некотором расстоянии, как до решетки, так и после нее. Выбор входного и выходного участков недостаточной длины может привести к неверным результатам расчета. С учетом этого, каждый участок расчетного объема (рис. 2), выполнен с удлинением. Так, для входного участка 1 – удлинение A , а для выходного участка 2 – удлинение B (рис. 2). В нашем случае длины входного и выходного участков равны соответственно 40 % и 45 % хорды основного профиля сопловой решетки. Схема расчетного объема представлена следующим образом (см. рис. 2).

Известно, что любой *CFD* программный комплекс нуждается в соответствующей настройке перед проведением расчетных исследований, которая заключается в подборе соответствующих параметров геометрии расчетной области, расчетной сетки, моделей турбулентности и т.д. [6], которые бы обеспечивали наилучшее совпадение результатов расчета с результатами экспериментальных исследований. Для решения подобных задач наиболее часто используется модель турбулентности *SST*; сетка должна быть такой, чтобы y^+ был не более 1.

2 Планирование и постановка вычислительного эксперимента

Предварительные вычисления и анализ опубликованных работ по теме исследования показали, что к числу параметров наиболее сильно влияющих на эффективность сопловых решеток можно отнести: отношение давлений на решетке (P_1/P_0^*); скорость натекания потока пара на решетку (C_0); угол натекания потока на решетку (α_0); эффективный угол выхода сопловой решетки (α_{10}); относительный радиус выходной кромки профиля (r_1/t_1); относительный шаг решетки (t_1/b_1). При этом, наиболее сильное влияние на эффективность сопловых решеток с поворотными диафрагмами оказывает ширина щели между поворотной диафрагмой и неподвижной частью сопловой решетки. В безразмерном виде этот параметр можно записать как отношение текущей ширины щели к максимальному ее значению (F/F_0).

Таким образом, при планировании вычислительного эксперимента, в качестве независимых факторов, существенно влияющих на эффективность сопловых решеток, были выбраны семь параметров, отмеченных выше. Следует отметить, что для обеспечения полной независимости факторов было принято решение провести специальные замены для первых двух параметров. Суть

этих замен и диапазоны изменения параметров в процессе вычислительного эксперимента приведены в табл. 1.

Использование насыщенного 7-ми факторного плана Рехтшафнера [9] и дополнительного плана [10] для повышения точности и адекватности аналитической зависимости вида (1) – формальной макромодели (ФММ), потребовали проведения 37 и 21 расчетов по оценке эффективности различных вариантов сопловых решеток с поворотными диафрагмами, соответственно.

Детальный анализ картин течения пара, представленных на рис. 4 показывает, что степень сложности течения существенным образом зависит от степени открытия/закрытия канала сопловой решетки.

Так, течение в канале (рис. 4а) с наибольшим закрытием ($F/F_0 = 0,1$) характеризуется существенным вихревым течением, наличием, как практически застойных зон $C_{\min} = 0,031$ м/с, так и сверхзвуковых течений $C_{\max} > 850$ м/с, что естественно ведет к увеличению потерь энергии в таком канале ($\varphi^2 = 0,39560$).

Несколько лучше картина течения наблюдается в канале, представленном на рис. 4б ($F/F_0 = 0,55$). В этом случае несколько увеличи-

лось ядро потока, уменьшилась область вихревого течения и разница скоростей внутри канала $C_{\min} = 0,22$ м/с, $C_{\max} = 580$ м/с, что привело к уменьшению потерь энергии в нем и повышению эффективности такого канала ($\varphi^2 = 0,7744$).

Таблица 1 – Диапазоны варьирования независимых параметров вычислительного эксперимента

№	Параметр	min	max
1	K_1 ,	0,25	0,36
2	K_2 ,	0,25	0,36
3	α_0 , град	80	100
4	α_{13} , град	10	20
5	r_1/t_1	0,01	0,02
6	t_1/b_1	0,65	0,85
7	F/F_0	0,1	1

Где коэффициенты K_1 и K_2 используются для вычисления отношения давлений на решетку P_1/P_0^* и скорости натекания C_0 соответственно по нижеприведенным зависимостям.

$$P_1/P_0^* = 0,8(K_1 + 0,8F/F_0),$$

$$C_0 = 35(K_2 + F/F_0).$$

$$y(q) = A_0 + \sum_{i=1}^n \left(a_{(i,k)} + \left(b_{(i,k)} + \left(\frac{c_{(i,k)}}{2} + \Delta q_{(i,k)} \frac{d_{(i,k)}}{6} \right) \Delta q_{(i,k)} \right) \Delta q_{(i,k)} \right) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n A_{ij} q_i q_j, \quad (1)$$

где $a_{(i,k)}$, $b_{(i,k)}$, $c_{(i,k)}$, $d_{(i,k)}$ – коэффициенты кубического сплайна, текущего (k -го) интерполяционного участка i -й независимой переменной. Для каждой независимой нормированной переменной q_i существует несколько интерполяционных участков в диапазоне между -1 и $+1$;

$\Delta q_{(i,k)}$ – расстояние между текущим значением q_i и координатой начального узла k -го участка сплайна, у которого значение координаты q_i находится между координатами начального (k -го) и конечного ($k+1$ -го) его узлов.

3 Создание ФММ оценки эффективности сопловых решеток и анализ полученных результатов

В соответствии созданными планами вычислительного эксперимента, используя разработанную подпрограмму профилирования (см. рис. 3), были спроектировано 58 вариантов сопловых решеток. Каждый вариант этих решеток был рассчитан с помощью программного CFD-комплекса, а результаты расчетов были использованы при создании вектора наблюдений [11, 12] для φ^2 сопловых решеток с поворотными диафрагмами. Ниже, для большей наглядности, на рис. 4 показаны кар-

тины течения пара в каналах сопловых решеток, характеризующихся различными уровнями относительного смещения поворотной и неподвижной ее частей.

Как и отмечалось выше, параметр F/F_0 существенным образом влияет не только на картину течения, но и на уровень эффективности сопловых решеток. Так, для решетки, показанной на рис. 4а $\varphi^2 = 0,3956$, для варианта решетки представленной на рис. 4б $\varphi^2 = 0,7744$ и, соответственно, для решетки (рис. 4в) $\varphi^2 = 0,9675$.

Наибольшей эффективностью ($\varphi^2 = 0,9675$) обладает канал с полностью открытым входным участком, что является вполне естественным. В данном случае ядро потока заполнило практически весь канал, явных вихревых течений не наблюдается, процесс изменения скоростей в канале носит обычный характер (на входе в канал $C_{\min} = 24$ м/с и на выходе из канала $C_{\max} = 350$ м/с).

Кроме этого, (см рис. 5), проведенные исследования показали не только существенное влияние на эффективность сопловых решеток с поворотными диафрагмами эффективного выходного угла (α_{13}), но и выявили наличие оптимального значения $\alpha_{13}^{\text{опт}} = 12,5^\circ - 13^\circ$.

Следующим фактором, который оказывает ощутимое влияние на эффективность сопловых

решеток является относительный шаг решетки. Однако уровень его влияния меньше, чем α_{13} и F/F_0 . Так, на рис. 6 показано совместное влияние относительного шага и эффективного угла выхода сопловой решетки на ее эффективность.

Обработка результатов численных исследований (вектора наблюдений) с использованием

методов теории планирования эксперимента позволила получить ФММ вида (1), предназначенную для оценки квадратов коэффициентов скорости решеток с поворотными диафрагмами.

Следует отметить, что результаты, приведенные на рис. 5 и 6 были получены с помощью, созданной ФММ.

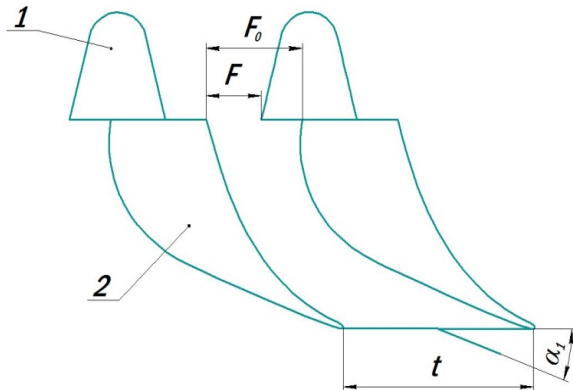


Рис. 1 – Канал решетки:

1 – поворотная часть диафрагмы;
2 – неподвижная часть диафрагмы

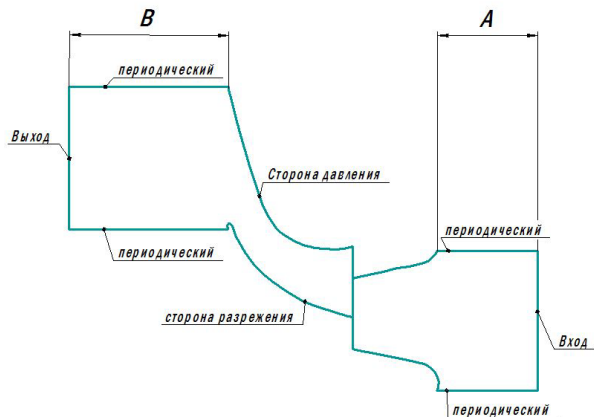


Рис. 2 – Расчетный канал

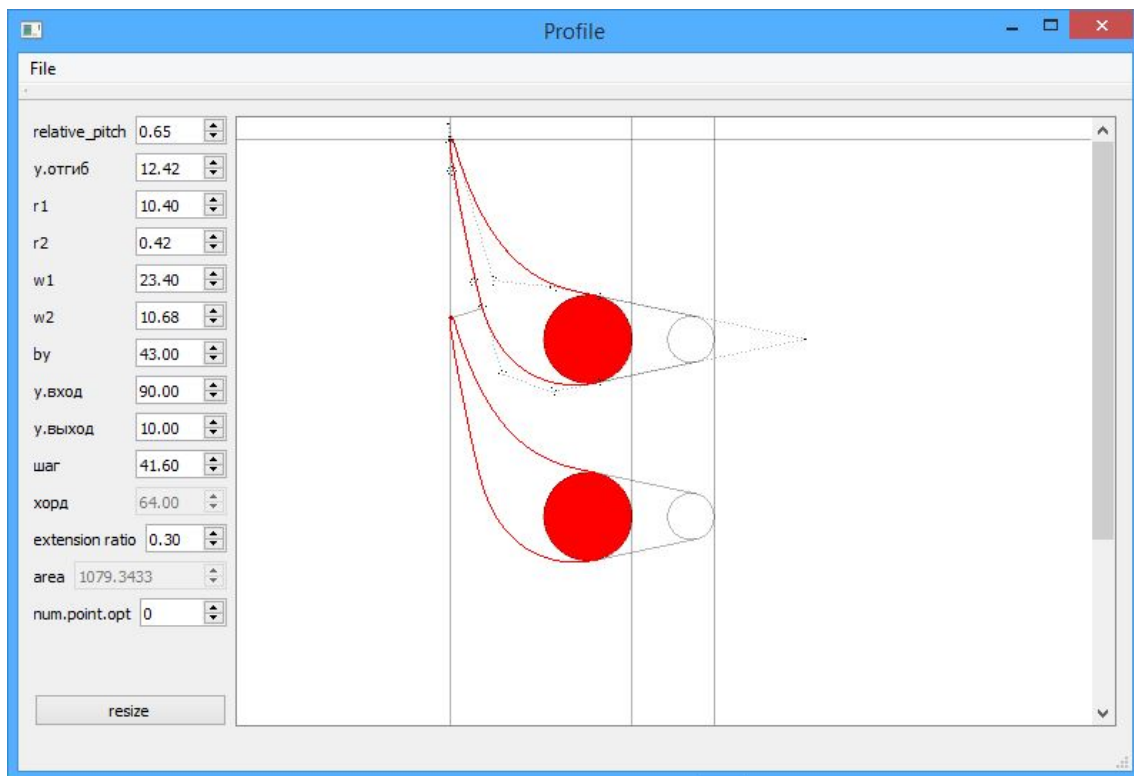


Рис. 3 – Вид диалогового окна подпрограммы профилирования

Как видно из рис. 6 для сопловых решеток с поворотными диафрагмами существует не только оптимальное значение α_{13} , но и значение относительного шага, обеспечивающее максимальную эффективность решетки $t_1/b_{1opt} = 0,71-0,75$.

Следует отметить, что по сравнению с влиянием F/F_0 , α_{13} , и t_1/b_{1opt} влияние остальных параметров на эффективность сопловых решеток с поворотными диафрагмами оказалось существенно меньше.

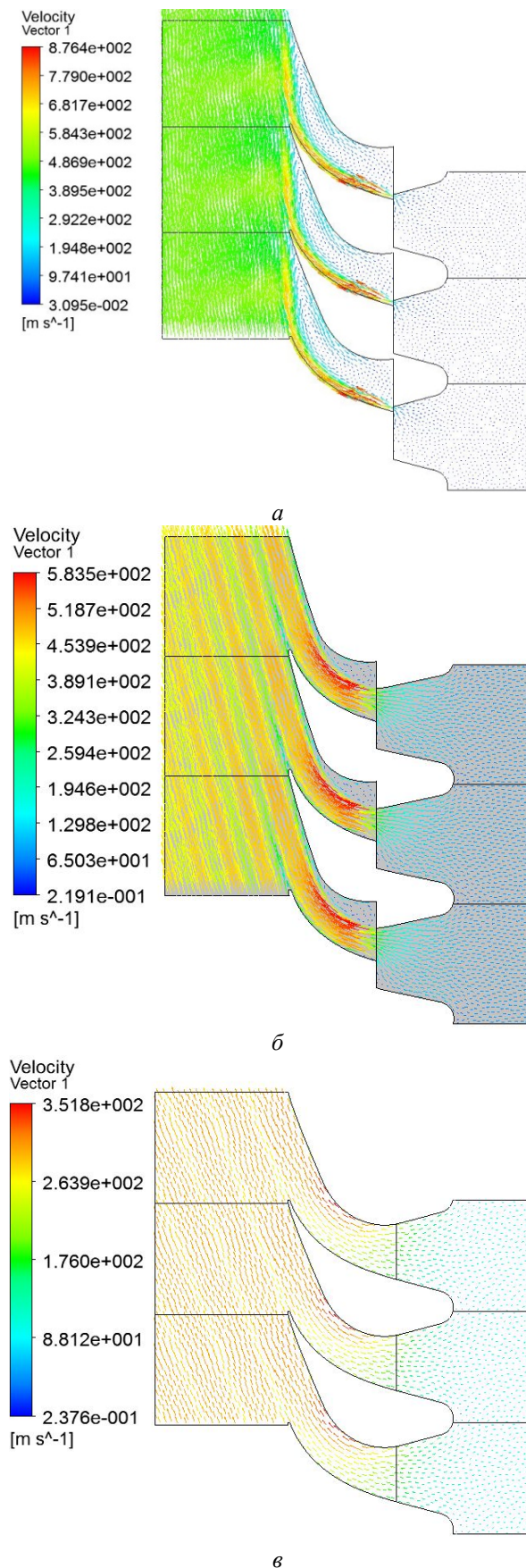
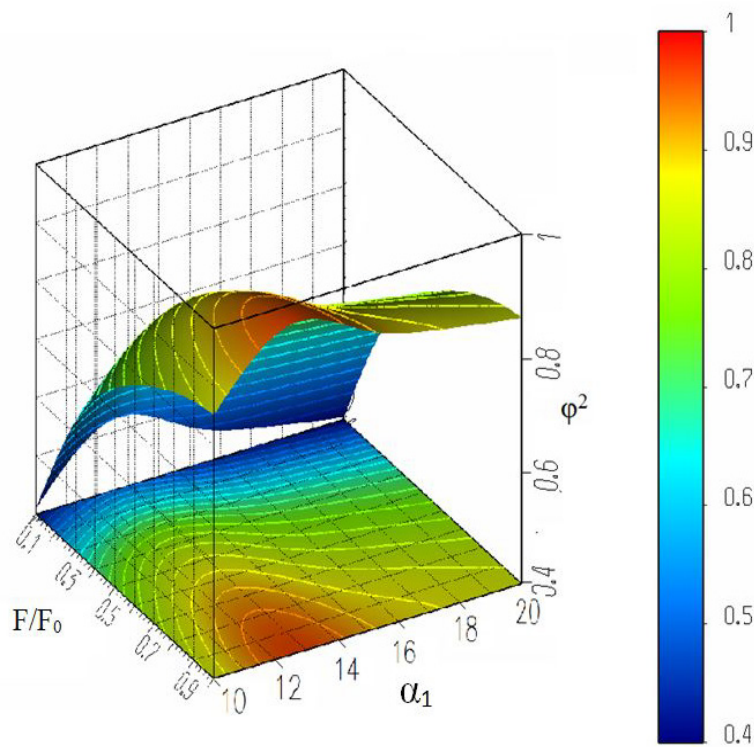
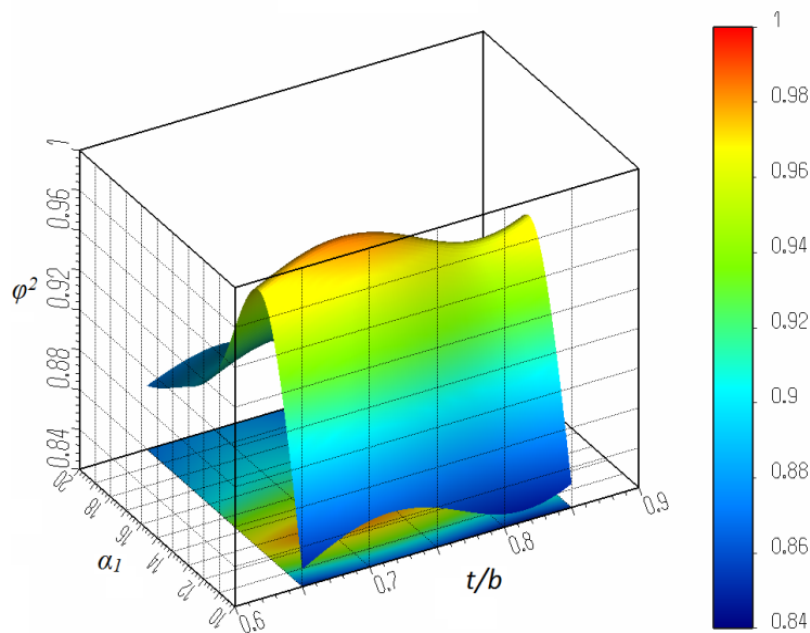


Рис. 4 – Распределение полей скоростей в каналах сопловой решетки с поворотной диафрагмой
 $a - F/F_0 = 0,1$; $б - F/F_0 = 0,55$; $в - F/F_0 = 1$

Рис. 5 – Зависимость φ^2 от α_{13} и F/F_0 Рис. 6 – Зависимость φ^2 от α_{13} и t_1/b_1

Выводы

1) Создана надежная и универсальная методика оценки эффективности сопловых решеток с поворотными диафрагмами для регулируемых турбинных ступеней теплофикационных турбин.

2) Анализ результатов показал, что квадраты коэффициентов скорости сопловых решеток с поворотными диафрагмами наиболее сильно зависят

от степени открытия входного участка сопловой решетки, эффективного угла выхода и относительного шага решетки.

3) Были выявлены оптимальные значения эффективного угла выхода $\alpha_{13}^{opt} = 12,5^\circ - 13^\circ$ и относительного шага решетки $t_1/b_{1opt} = 0,71 - 0,75$.

4) Применение в комплексе теории планирования эксперимента и двухмерного CFD-моделирования течения рабочего тела в каналах

сопловых решеток позволило существенно сократить время проведения численных исследований и получить надежную и универсальную зависимость для оценки эффективности сопловых решеток с поворотными диафрагмами

Список литературы

1. Бойко А. В., Усатый А. П. Комплексная математическая модель процессов в турбине с регулируемыми отборами пара. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харків : НТУ «ХПІ», 2016. № 8(1180). С. 28–36. Бібліогр.: 11 назв. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.04.
2. Chung T. J. *Computational fluid dynamics*. Cambridge: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2002. 1022 p. ISBN 0521-59416-2.
3. Siclari M. J. and Jameson, A. A multigrid finite volume method for solving the Euler and Navier-Stokes equations for high speed flows. *AIAA paper*. 1989. AIAA-89-0283.
4. Chung T. J. Finite Element Analysis in Fluid. New York: McGraw-Hill. Transitions and interactions of inviscid/viscous, compressible/incompressible and laminar/turbulent flow. *Int. J. Num. Meth. Fl.* 1978. No. 31, pp. 23-46.
5. Knupp P. and Steinberg S. *Fundamentals of grid generation*. CRC Press, 1992.
6. Бойко А. В., Говорущенко Ю. Н., Бурлака М. В. *Применение вычислительной аэродинамики к оптимизации лопаток турбомашин* : монография. Харьков: НТУ «ХПІ», 2012. 192 с. На русск. яз. ISBN 978-617-05-0010-6.
7. Гукасова Е. А., Жуковский М. И., Зысина-Моложен Л. М. и др. *Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов паровых и газовых турбин*. Москва: Госэнергоиздат, 1961. 167 с.
8. Мельтюхов В. А. *Оценка качества новых турбинных решеток профилей для режимов диффузорного и конфузорного течений* : дис. ... канд. техн. наук 05.04.12 турбомашин и турбоустановки. Харьков, 1986. 205 с.
9. Rechtschaffner R. L. Saturated fractions of 2n and 3n factorial designs. *Technometrics*. 1967. No. 4. pp. 569–575.
10. Бойко А. В., Усатый А. П., Баранник В. С. Повышение точности формальной макромодели при планировании эксперимента. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси та устаткування*. Харьков: НТУ «ХПІ», 2013. № 12(986). С. 5-9. Бібліогр.: 4 назв. ISSN 2078-774X.
11. Усатый А. П. *Всерезжимная многопараметрическая многокритериальная оптимизация проточной части турбин в интегрированном информационном пространстве* : дис. ... д-р техн. наук. Специальность 05.05.16 – «Турбомашини та турбоустановки», науковий консультант – проф. А. В. Бойко, спецрада Д 64.050.11, Харьков: НТУ «ХПІ», 2013.
12. Бойко А. В., Усатый А. П., Руденко А. С. Многокритериальная многопараметрическая оптимизация проточной части осевых турбин с учетом режимов эксплуатации : монография. Харьков: НТУ «ХПІ», 2014. 220 с. На рус. яз.

References (transliterated)

1. Boiko, A. V. and Usaty, A. P. (2016), "Integrated Mathematical Model of the Processes in the Turbine with Adjustable Steam Extraction", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 8(1180), pp. 28–36, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.04.
2. Chung T. J. (2002), *Computational fluid dynamics*, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, Cambridge, 1022 p. ISBN 0-521-59416-2.
3. Siclari, M. J. and Jameson, A. (1989), "A multigrid finite volume method for solving the Euler and Navier-Stokes equations for high speed flows", *AIAA paper*, AIAA-89-0283.
4. Chung, T. J. (1978), "Finite Element Analysis in Fluid. New York: McGraw-Hill. Transitions and interactions of inviscid/viscous, compressible/incompressible and laminar/turbulent flow", *Int. J. Num. Meth. Fl.*, No. 31, pp. 23-46.
5. Knupp P., Steinberg S. (1992), *Fundamentals of grid generation*. CRC Press.
6. Boyko A. V., Govoruschenko Yu. N., Burlaka M.V. (2012), *Primenenie vychislitel'noy aerodinamiki k optimizatsii lopatok turbomashin* [Application of computational aerodynamics to optimization of turbomachine blades], NTU "KhPI", Kharkov, Ukraine, 192 p., ISBN 978-617-05-0010-6.
7. Gukasova E. A., Zhukovskiy M. I., Zysinina, L. M. (1961), *Aerodinamicheskoe sovershenstvovanie lopatochnykh apparatov parovykh i gazovykh turbin* [Aerodynamic perfection of the scapular blades of steam and gas turbines], Gosenergoizdat, Moscow, Russian, 167 p.
8. Meltyuhov V. A. (1986), *Otsenka kachestva novykh turbinnykh reshetok profiley dlya rezhimov diffuzornogo ikonfuzornogo techeniy: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Evaluation of the quality of new turbine profile grids for the diffusive lufshuzorny current modes. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)], Kharkiv, 205 p.
9. Boiko A. V., Usaty A. P., Barannik V. S. (2013), "Povyishenie tochnosti formal'noy makromodeli pri planirovanii eksperimenta [The increasing of formal macromodel accuracy when planning the experiment]", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 12(986), pp. 5–9, ISSN 2078-774X.
10. Rechtschaffner R. L. (1967), "Saturated fractions of 2n and 3n factorial designs", *Technometrics*, No. 4, pp. 569–575.
11. Usaty, A. P. (2012), *Vserezhimnaya mnogoparametricheskaya mnogokriterial'naya optimizatsiya protochnoy chasti turbin v integrirovannom informatsionnom prostranstve: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Multi-mode multi-parameters multi-criterion optimization of the turbine flow path in the integrated information space. Dr. eng. sci. diss.], NTU "KhPI", Kharkov, Ukraine.
12. Boiko, A. V., Usaty, A. P. and Rudenko, A. S. (2014), *Mnogokriterial'naya mnogoparametricheskaya optimizatsiya protochnoy chasti osevykh turbin s uchetom rezhimov jekspluatatsii* [Multi-criterion multi-parametric optimization of flow paths of axial turbines taking into consideration their mode of operation], NTU "KhPI", Kharkov, Ukraine.

Поступила (received) 03.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Усатий Олександр Павлович (Usaty Alexander Pavlovich, Usaty Alexander) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри турбінобудування, м. Харків, Україна; e-mail: alpaus@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8568-5007>.

Фам Туан Ань (Fam Tuan Anh, Pham Tuan) – магістр, кафедра турбінобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: Anhvanhp93@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0462-3075>.