ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-257-265

COMPARISON OF THE VELOCITY COEFFICIENTS VALUES IN THE TURBINE STAGE WITH PARTIAL BLADING OF THE RUNNER

A. A. Kryukov, S. V. Chekhranov

Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russian Federation

Modern marine turbine units are distinguished by a variety of purposes, types, structural differences, materials and working bodies. This diversity is ensured by the use of innovative information technologies from the preproduction process to the production of final products. It is noted that at the design stage of the turbomachine, it is necessary to take into account the external characteristics of the stage — power, angular velocity, shaft torque, efficiency, etc. It is emphasized that in an effort to reduce the losses in the stage, engineers resort to creating low-consumption partial turbines, in which a significant part of the losses from the partiality decreases due to changes in design parameters. An example of such a design is a turbine with partial blading of the runner. The object of the study is a low-consumption inflow turbine with partial blading of the runner with different admission intensity. The subject of the study is the gas-dynamic characteristics of the flow part of the nozzle diaphragm and the runner of the low-consumption inflow turbine. The main objective of the study is to compare the values of the velocity coefficients of the nozzle diaphragm and the runner of the turbine stage. It is noted that low-consumptions are characterized by small dimensions that do not allow to properly conducting a physical experiment. The method of research in the proposed work is numerical simulation of gas flow using computational gas dynamics. The graphs of the dependence of the velocity coefficients of the nozzle diaphragm and the runner at different admission intensity on u_1/C_0 are presented in the paper. The unsatisfactory convergence of the coefficients values is established and recommendations for improving the convergence of the gas-dynamic calculation are proposed.

Keywords: nozzle diaphragm, runner, velocity coefficients, admission intensity, simulation, numerical method, experiment.

For citation:
Kryukov, Aleksey A., and Sergei V. Chekhranov. "Comparison of the velocity coefficients values in the turbine stage with partial blading of the runner." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 257–265. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-257-265.

УДК 621.515.001.5

СРАВНЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ СКОРОСТИ В ТУРБИННОЙ СТУПЕНИ С ЧАСТИЧНЫМ ОБЛОПАЧИВАНИЕМ РАБОЧЕГО КОЛЕСА

А. А. Крюков, С. В. Чехранов

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет», г. Владивосток, Российская Федерация

В работе исследованы современные судовые турбоагрегаты, отличающиеся многообразием назначения, типов, конструкционных отличий, материалов и рабочих тел. Такое разнообразие обусловлено применением инновационных информационных технологий — от процесса подготовки производства до выпуска конечной продукции. Отмечается, что на этапе проектирования турбомашины необходимо учитывать внешние характеристики: мощность, угловую скорость, крутящий момент на валу, коэффициент полезного действия, характеризуемый потерями, которые имеются в ступени, и др. Подчеркивается, что в стремлении снизить потери в ступени инженеры прибегают к созданию малорасходных парциальных турбин, у которых существенная часть потерь от парциальности уменьшается в связи с изменением конструктивных параметров. Примером такой конструкции является турбина с частичным облопачиванием рабочего колеса, объектом исследования — малорасходная центростремительная турбина с частичным облопачиванием рабочего колеса с различной степенью парциальности. Предметом исследования являются газодинамические характеристики проточной части соплового аппарата

и рабочего колеса малорасходной центростремительной турбины. Основной задачей исследования является сравнение значений коэффициентов скорости соплового аппарата и рабочего колеса турбинной ступени. Отмечается, что малорасходные турбины характеризуются малыми размерами, не позволяющими в должной мере качественно проводить физический эксперимент. Методом исследования в предлагаемой работе является численное моделирование течения газа с использованием вычислительной газовой динамики. В работе представлены графики зависимости коэффициентов скорости соплового аппарата и рабочего колеса при различной степени парциальности от u_1/C_0. Установлена неудовлетворительная сходимость значений коэффициентов и предложены рекомендации по улучшению сходимости газодинамического расчета.

Ключевые слова: сопловой аппарат, рабочее колесо, коэффициент скорости, степень парциальности, моделирование, численный метод, эксперимент.

Для цитирования:
Крюков А. А. Сравнение значений коэффициентов скорости в турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Чехранов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 257–265. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-257-265.

Введение (Introduction)

В работе [1] исследуются модели, в которых коэффициенты скорости сопловых аппаратов (СА) и рабочих колес (РК) приняты по результатам обобщений экспериментальных исследований традиционных парциальных турбин. Результаты исследования [2] показали наличие влияния крайних сопловых каналов в турбине с частичным облопачиванием рабочего колеса на суммарный коэффициент скорости соплового аппарата турбинной ступени. Это служит основанием для необходимости совершенствования предложенной ранее математической модели течения потока и замены методики определения коэффициентов скорости соплового аппарата и рабочего колеса.

Малорасходные турбины характеризуется рядом специфических свойств, в том числе малоразмерностью, которые не позволяют в должной мере проводить физические эксперименты. В связи с развитием информационных технологий широкое распространение получил *численный метод CFD* (вычислительная газовая динамика), позволяющий получать выходные параметры потока в турбинных ступенях, а также визуальное отображение структуры течения. Замена физического эксперимента численным дает возможность применять программные системы *CFD* в качестве имитационно стенда, что подтверждено рядом исследований [3]–[7].

В процессе внедрения численных экспериментов можно установить отличительные особенности характера течения потока в турбине с частичным облопачиванием рабочего колеса от традиционных парциальных турбин и принять решение о необходимости полуэксперементального исследования характеристик потока в СА и РК с помощью имитационного стенда.

Целью исследования является определение характерных различий значений коэффициентов скорости соплового аппарата и рабочего колеса, полученных на основе результатов обобщений экспериментальных исследований традиционных парциальных турбин и численного исследования турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса с использованием ANSYS CFX.

Задачи исследования:

– сравнить значения коэффициентов скорости СА и РК турбинной ступени со степенью парциальности ε = 1,00, полученные в ходе традиционного расчета и с использованием имитационно стенда;

– сравнить значения коэффициентов скорости СА и РК турбинных ступеней со степенью парциальности ε = 0,059–0,412 на интервале u_1/C_0 = 0,1–0,9 и в диапазоне π_t = 1,5–2,5;

– сформулировать методические рекомендации по дальнейшему применению полученных данных.

Объектом исследования является центростремительная малорасходная турбина с частичным облопачиванием РК с различной степенью парциальности, предметом исследования служат газодинамические характеристики проточной части соплового аппарата и рабочего колеса малорасходной

центростремительной турбины, методом исследования — численное моделирование течения газа с использованием вычислительной газовой динамики.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При проведении исследования особенностей структуры потока в проточной части турбины с частичным облопачиванием РК применяется *метод численного моделирования*, использование которого позволяет собрать информацию о поле скоростей потока в проточной части для уточнения данных, полученных в процессе проведения физических опытов. Важность использования такого метода в данной работе обеспечена характерными особенностями исследуемой проточной части ступени, которая имеет небольшие геометрические размеры и не позволяет применять в ходе эксперимента измерительные приборы для качественного исследования структуры потока.

Численное моделирование, применяемое в качестве дополняющего и уточняющего метода к проведению газодинамического эксперимента, позволяет снизить затраты времени и ресурсов за счет уменьшения количества опытов на физической турбинной ступени. На основе конкретизированных данных о потоке в проточной части ступени, полученных этим методом, появляется возможность решить вопрос об эффективности рабочего процесса в турбинной ступени и сформулировать методы его усовершенствования.

При использовании метода численного моделирования течения рабочего тела в турбинной ступени применяется система уравнений, которые описывают перемещение потока газа в проточной части, состоящая из уравнений сохранения энергии, количества движения, момента количества движения и неразрывности. Кроме того, применяются уравнения состояния газа и учитываются вязкость газа и турбулентность течения потока.

В настоящее время существующие наработки [8]–[11] в создании численных методов решения уравнений описывают перемещение турбулентного потока газа. Использование данных методов устанавливает дополнительные требования к квалифицированному подходу и проверке достоверности полученных расчетных данных путем сопоставления их с опытными данными. Технические характеристики турбинных ступеней приведены в таблице, визуальные трехмерные модели — на рис. 1.

Характеристики турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса

Угол наклона сопел соплового аппарата, град.	Высота сопла, мм	Шаг сопел, мм	Ширина горла, мм	$Z_{СА}$ сопел, СА	$\beta_{1РК}$, град.	$\beta_{2РК}$, град.	$Z_{РК}$ лопаток РК
16,31	2,53	5,88	1,45	27	90	42	34
	2,53	5,88	1,45	27	90	42	13
	2,53	5,88	1,45	27	90	42	6
	2,53	5,88	1,45	27	90	42	3
	2,53	5,88	1,45	27	90	42	1
	$L_{РК}$ вход, мм	$L_{РК}$ выход, мм	Ширина горла, мм	Шаг лопаток, мм	$\varepsilon_{экв}$	$D_{н}$, мм	$D_{вн}$, мм
	3,29	4,3	1,5	2,54	1,00	50	27,5
	3,29	4,3	1,5	2,54	0,412	50	27,5
	3,29	4,3	1,5	2,54	0,206	50	27,5
	3,29	4,3	1,5	2,54	0,118	50	27,5
	3,29	4,3	1,5	2,54	0,059	50	27,5

Процесс численного исследования турбинной ступени с частичным облопачиванием РК состоит из пяти этапов:

1-й этап — создание геометрических моделей турбины и различной степенью парциальности с использование систем CAD-моделирования;

2-й этап — генерация сеточной модели с использованием параметров сетки, применяемой в исследовании [2];

3-й этап — задание граничных условий, применимых к данному численному эксперименту (параметры рабочего тела и модели турбулентности, частота вращения, интерфейс сопряжения, количество итераций и др.) при создании расчетной модели;

4-й этап — продолжительный период времени, который занимает поиск решения в главном модуле с учетом требуемых значений невязок и небалансов;

5-й этап — анализ результатов расчетов.

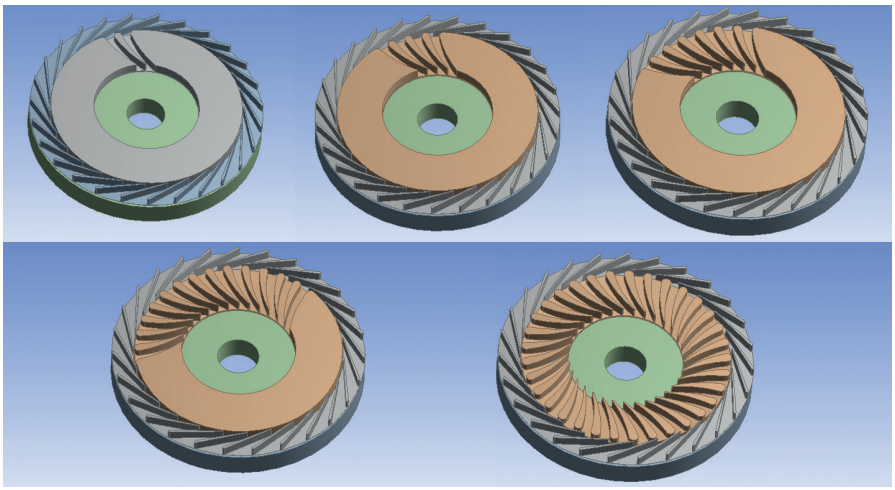


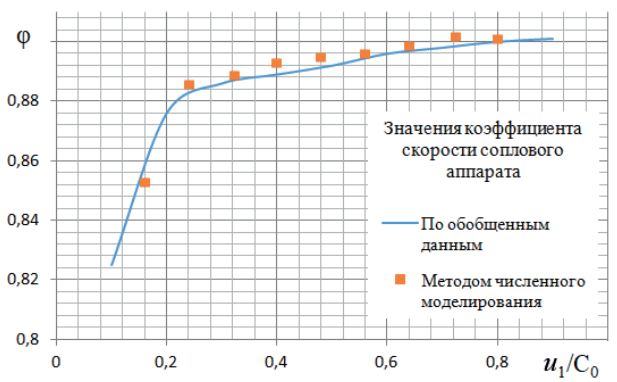
Рис. 1. Турбинные ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса с различной степенью парциальности в диапазоне ε = 0,059–1

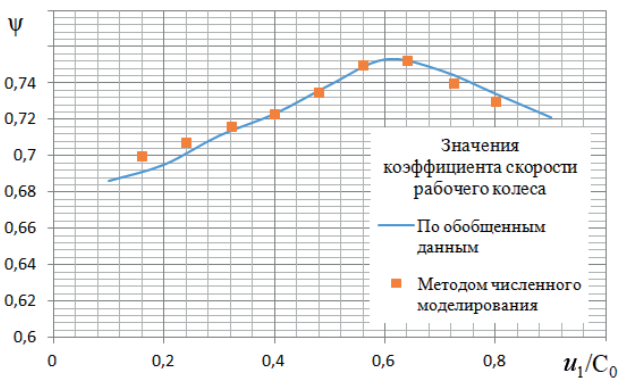
Численное исследование выполнялось при соблюдении следующих граничных условий:
– постановка задачи — нестационарная задача;
– рабочее тело — Air Ideal Gas;
– модель турбулентности — SST (Shear Stress Transport);
– давление торможения потока на входе в ступень — $(1{,}5–2{,}5)\cdot10^5$ Па;
– температура торможения потока на входе в ступени — 293 К;
– давление в потоке на выходе из ступени — 10^5 Па;
– диапазон частот вращения РК 20 000–100 000 мин$^{-1}$.

Результаты (Results)

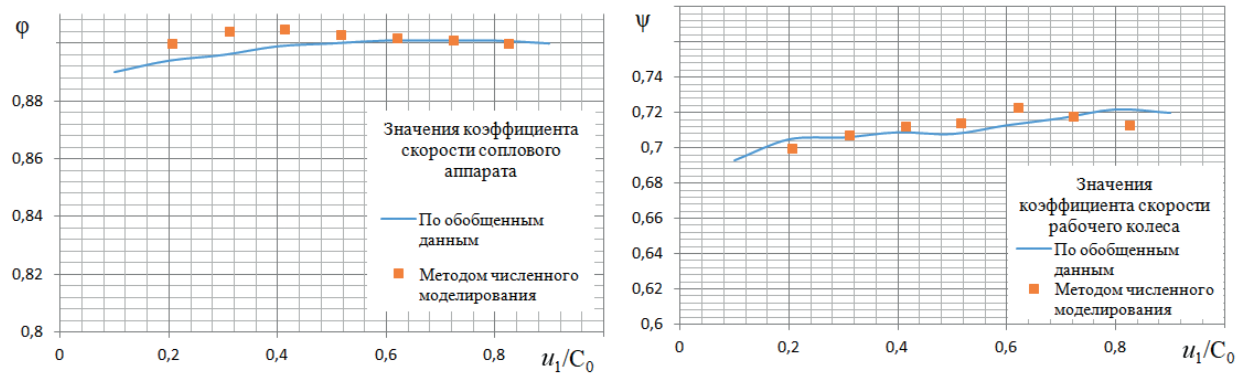
Сравнительный анализ значений коэффициентов скорости СА и РК турбинной ступени со степенью парциальности ε = 1,00, полученных в ходе традиционного расчета и с использованием имитационного стенда позволяют сделать вывод о целесообразности его применения при определении значения коэффициентов скорости СА и РК. На рис. 2 показаны графики зависимости коэффициентов скорости СА и РК от u_1/C_0 при различной степени расширения ступени $\pi_т$.

а)





б)



в)

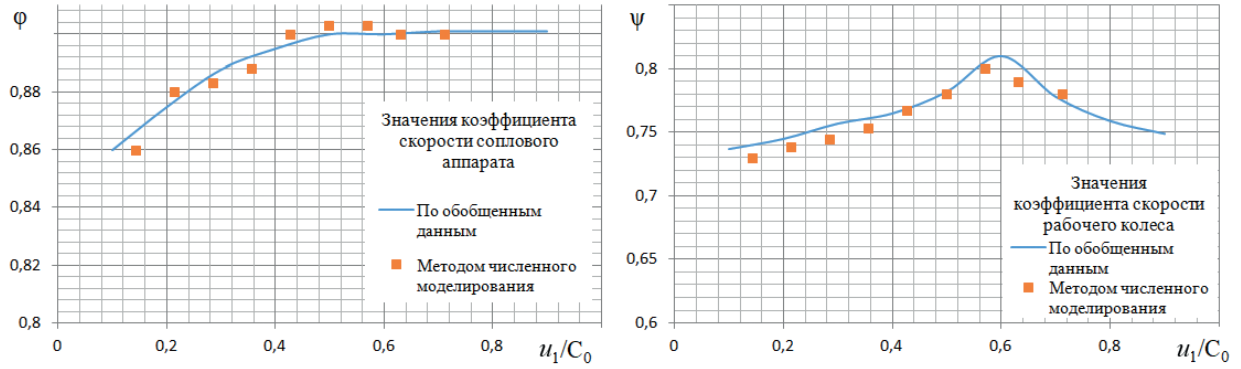


Рис. 2. Графики зависимости коэффициентов φ и ψ в турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса: *а* — при ε = 1,00 и $\pi_т$ = 2,0; *б* — при ε = 1,00 и $\pi_т$ = 1,5; *в* — ε = 1,00 и $\pi_т$ = 2,5

На графиках зависимости видна высокая сходимость значений коэффициентов скорости СА и РК, полученных различными способами. Это показывает правильность выбора расчетной сетки, граничных условий и критериев сходимости газодинамических расчетов. Также это может свидетельствовать о целесообразности применения методов CFD вместо традиционно используемых методов выполнения газодинамических расчетов. В результате использования данного метода определения коэффициентов скорости СА и РК применительно к турбинным ступеням с частичным облопачиванием рабочего колеса с некоторой степенью парциальности получают подобные графики зависимости (рис. 3 и 4).

а)

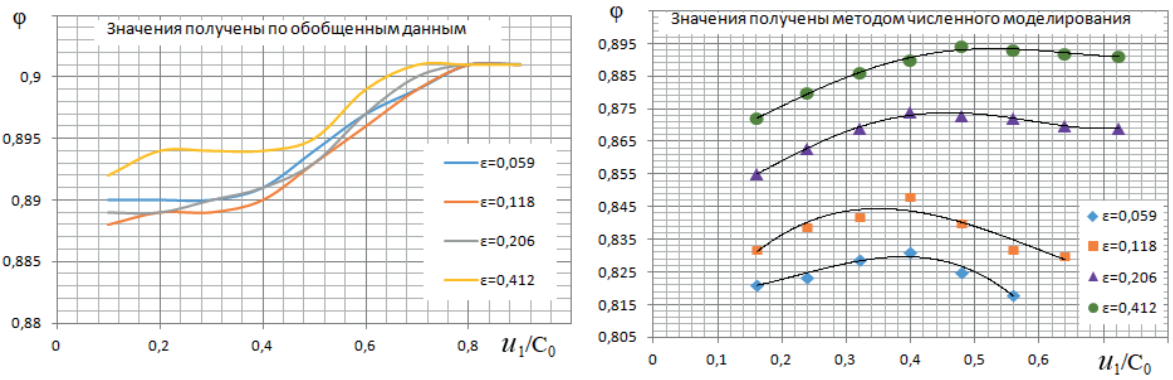


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента скорости соплового аппарата (*а*) (начало)

б)

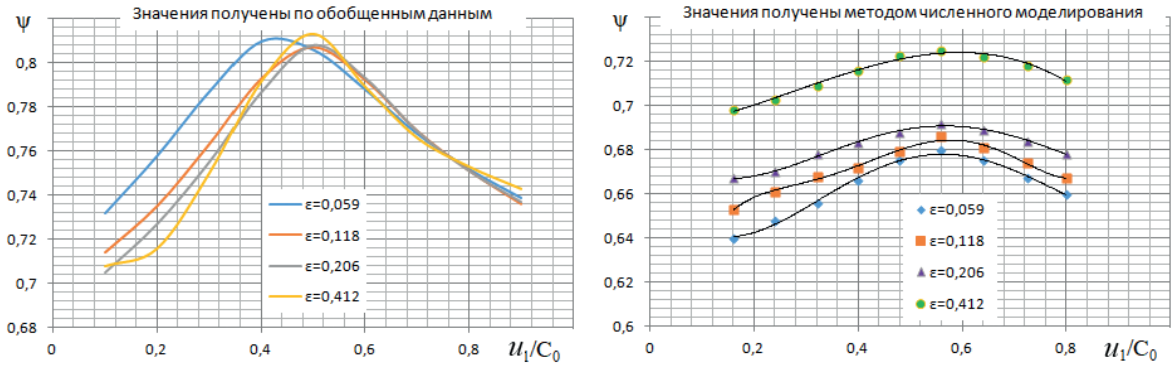
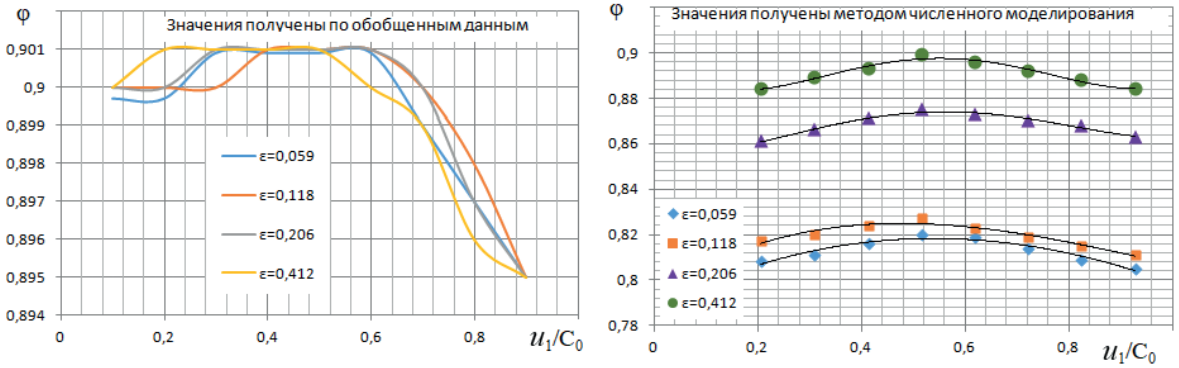


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента скорости рабочего колеса (*б*) турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса при ε = 0,059–0,412 и $\pi_т$ = 2,0 (окончание)

а)



б)

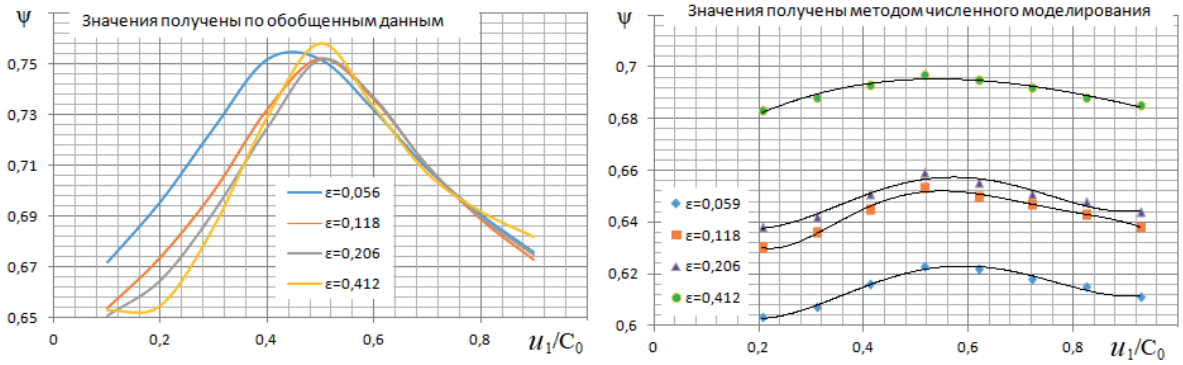
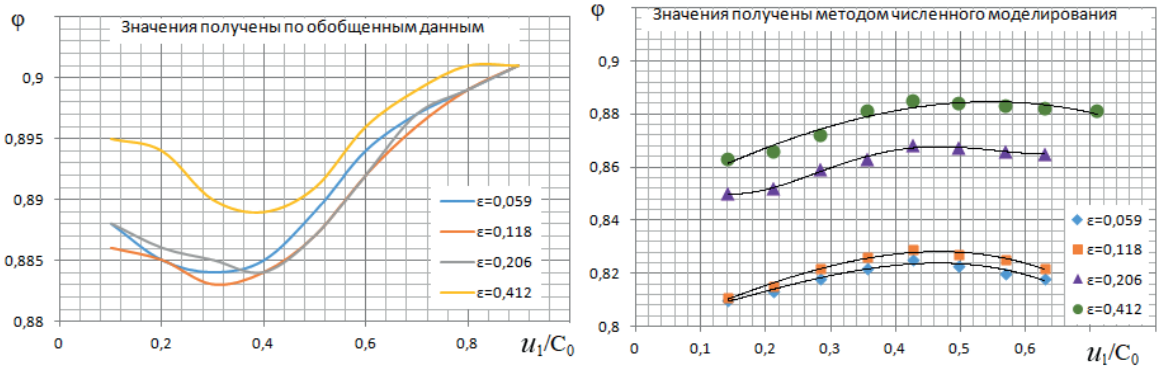


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента скорости соплового аппарата (*а*) и рабочего колеса (*б*) турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса при ε = 0,059–0,412 и $\pi_т$ = 1,5

а)



б)

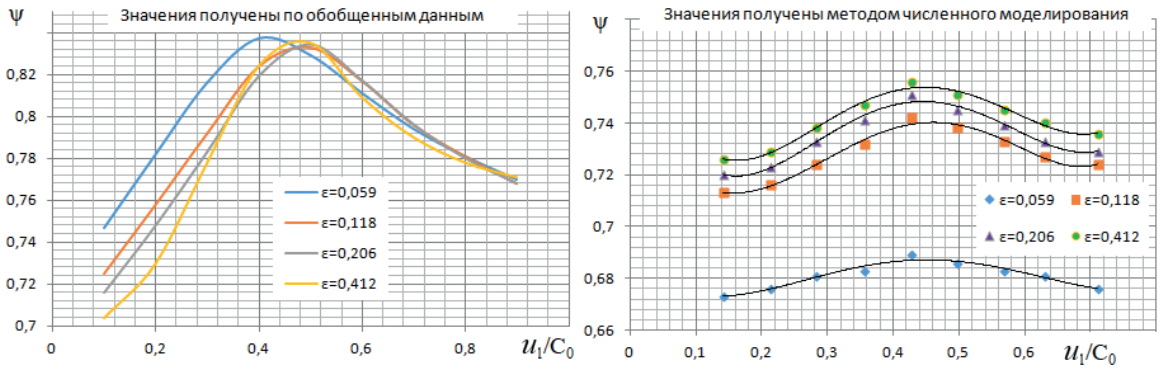


Рис. 5. Графики зависимости коэффициента скорости соплового аппарата (*а*) и рабочего колеса (*б*) турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса при ε = 0,059–0,412 и $\pi_т$ = 2,5

Результаты, приведенные на рис. 3–5, показывают неудовлетворительную сходимость значений коэффициентов скорости соплового аппарата и рабочего колеса, полученных на основе обобщенных экспериментальных данных традиционных парциальных турбин с данными, полученными в ходе численного эксперимента.

Обсуждение (Discussion)

Сравнение графиков зависимости коэффициентов скорости СА и РК от u_1/C_0 позволяет сделать вывод о некотором снижении значений коэффициентов, полученных методом численного моделирования. Это объясняется влиянием крайних сопловых каналов на общее течение потока [2], невозможным в традиционных парциальных турбинах. Образование застойных зон (зон рециркуляции) в крайних сопловых каналах приводит к снижению скорости C_1, что обусловливает понижение коэффициента скорости соплового аппарата φ. Под влиянием крайних сопловых каналов газодинамические параметры на входе в рабочее колесо отличаются от параметров, которые могли быть в традиционной парциальной турбине. На выходе из ступени значение скорости w_2 тоже будет отличаться от значения скорости, которая могла бы быть в традиционной парциальной турбине, что также ведет к понижению коэффициента скорости рабочего колеса ψ.

В процессе перехода к общей оценке графиков зависимости коэффициента скорости СА и РК от u_1/C_0 можно наблюдать повышение значения коэффициентов вслед за увеличением u_1/C_0. При достижении оптимального значения u_1/C_0 происходит коррекция и снижение коэффициентов. Существенное влияние на значение коэффициента скорости СА оказывает число Маха, оптимальное значение которого составляет M = 0,55–0,6.

Поскольку в турбинах с частичным облопачиванием РК характер течения потока существенно отличается от течения в традиционных парциальных турбинах, математическую модель [1] нельзя полностью считать адекватной. Ввиду существенной разницы в значениях коэффициентов скорости СА и РК необходимо ее уточнение в части определения этих коэффициентов. Применение методов математического моделирования позволяет определять математические зависимости (полиномов) коэффициентов скорости СА и РК от различных параметров: степени парциальности, числа Маха [7], степени расширения [8] и других в широком диапазоне u_1/C_0.

Выводы (Symmaru)

На основе выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

– при сравнении значений коэффициентов скорости соплового аппарата и рабочего колеса, полученных различными способами, возникает вывод о целесообразности их применения как с использованием обобщенных данных, так и метода численного моделирования;

– наличие парциальности в турбинной ступени с частичным облопачиванием РК оказывает влияние на конечное значение коэффициентов скорости СА и РК, что приводит к некоторому снижению их значений по отношению к обобщенным данным;

– применение CFD-метода позволяет выявить снижение значений коэффициентов скорости соплового аппарата и рабочего колеса в широком диапазоне u_1/C_0 и $\pi_т$;

– для уточнения существующей математической модели [1] необходимо использовать математические зависимости (полиномы) коэффициентов скорости СА и РК от различных параметров $\pi_т$, ε, число Маха и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чехранов С. В.* Математическая модель радиальной малорасходной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / С. В. Чехранов, Р. Р. Симашов // Транспортное дело России. — 2015. — № 6. — С. 222–226.

2. *Крюков А. А.* Численное исследование течения потока в ступени центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Чехранов // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 4–1 (50). — С. 114–120. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.016.

3. *Епифанов А. А.* Расчет трехмерного течения в ступенях малорасходных турбин / А. А. Епифанов, А. И. Кириллов, В. А. Рассохин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2012. — № 1 (142). — С. 65–70.

4. *Забелин Н. А.* Исследование особенностей течения в малорасходных турбинных ступенях конструкции ЛПИ / Н. А. Забелин [и др.] // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2013. — № 1 (166). — С. 45–53.

5. *Нгуен А. К.* Характеристики и структура потока турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности / А. К. Нгуен, К. Л. Лапшин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2016. — № 2 (243). — С. 163–173. DOI: 10.5862/JEST.243.17.

6. *Нгуен А. К.* Влияние тангенциального наклона рабочих лопаток на потери кинетической энергии / А. К. Нгуен, К. Л. Лапшин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. — 2017. — Т. 23. — № 4. — С. 66–73. DOI: 10.18721/JEST.230406.

7. *Kryukov A. A.* Determination of the velocity coefficient of a turbine nozzle diaphragm with partial blading of the runner / A. A. Kryukov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 986. — Is. 1. — Pp. 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/986/1/012045.

8. *Крюков А. А.* Трехмерное численное моделирование малорасходной центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Чехранов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 1. — С. 74–80. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-74-80.

9. *Rassokhin V.* The design of microturbine units with low-consumed turbines constructed by LPI for heat recovery of exhaust gases of internal combustion engines / V. Rassokhin, N. Zabelin, H. Kunte, J. Seume, S. Olennikov, M. Cherkasova, A. Sebelev // Results of joint research activity of scientists from Saint-Petersburg State Polytechnical University and Leibniz University of Hannover. — Polytechnical University Publishing House, 2014. — Pp. 139–155.

10. *Rakov G.* A low emission axial-flow turbine for the utilization of compressible natural gas energy in the gas transport system of Russia / G. Rakov, V. Rassokhin, N. Zabelin, S. Olennikov, A. Sebelev, A. Sukhanov, S. Schislyaev // International Journal of environmental & science education. — 2016. — Vol. 11. — No. 18. — Pp. 11721–11733.

11. *Smirnov M. V.* Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part I / M. V. Smirnov, A. A. Sebelev, N. A. Zabelin, N. I. Kuklina // Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics. — Stockholm, Sweden, 2017. — Paper ID: ETC2017–100.

REFERENCES

1. Chekhranov, S., and R. Simashov. “Mathematical model of a radial-flow low-consumption turbine having partially bladed wheel rotor.” *Transport business of Russia* 6 (2015): 222–226.

2. Krykov, Aleksey A., and Sergei V. Chekhranov. "Numerical experiment of flow in stages of inflow turbine with fractional blading of the rotor wheel." *Marine intelligent technologies* 4–1(50) (2020): 114–120. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.016.

3. Epifanov, A. A., A. I. Kirillov, and V. A. Rassohin. "Raschet trehmernogo techenija v stupenjah malorashodnyh turbin." *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* 1(142) (2012): 65–70.

4. Zabelin, N. A., G. L. Rakov, V. A. Rassokhin, A. A. Sebelev, and M. V. Smirnov. "Investigation of flow characteristics in low-flow turbine stages of the design of LPI." *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* 1(166) (2013): 45–53.

5. Nguyen, A. Q., and K. L. Lapshin. "Characteristics and structure of the flow in a turbine stage with a negative gradient of the degree of reactivity." *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* 2(243) (2016): 163–173. DOI: 10.5862/JEST.243.17.

6. Nguyen, A. Q., and K. L. Lapshin. "The influence of tangential inclination of rotor blades on kinetic energy losses in an axial turbine stage." *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology* 23.4 (2017): 66–73.

7. Kryukov, A. A., G. L. Rakov, S. V. Chekhranov, and R. R. Simashov. "Determination of the velocity coefficient of a turbine nozzle diaphragm with partial blading of the runner." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* Vol. 986. No. 1. IOP Publishing, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/986/1/012045.

8. Kriukov, Aleksei Alekseevich, and Sergei Valentinovich Chekhranov. "Three-dimensional numerical simulation of low-consumption inflow turbine with partial blading of runner." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2021): 74–80. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-74-80.

9. Rassokhin, V., N. Zabelin, H. Kunte, J. Seume, S. Olennikov, M. Cherkasova, and A. Sebelev. "The design of microturbine units with low-consumed turbines constructed by LPI for heat recovery of exhaust gases of internal combustion engines." *Results of joint research activity of scientists from Saint-Petersburg State Polytechnical University and Leibniz University of Hannover.* Polytechnical University Publishing House, 2014. 139–155.

10. Rakov, Gennadiy, Viktor Rassokhin, Nikolay Zabelin, Sergey Olennikov, Aleksandr Sebelev, Aleksandr Sukhanov, and Sergey Schislyaev. "A Low Emission Axial-Flow Turbine for the Utilization of Compressible Natural Gas Energy in the Gas Transport System of Russia." *International Journal of environmental & science education* 11.18 (2016). 11721–11733.

11. Smirnov, M. V., A. A. Sebelev, N. A. Zabelin, and N. I. Kuklina. "Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part I." *Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics.* Stockholm, Sweden, 2017. Paper ID: ETC2017–100.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крюков Алексей Алексеевич — аспирант
Научный руководитель:
Чехранов Сергей Валентинович
ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет»
690087, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б
e-mail: *aleksey902@mail.ru*
Чехранов Сергей Валентинович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет»
690087, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б
e-mail: *turboroom@yandex.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kryukov, Aleksey A. — Postgraduate
Supervisor:
Chekhranov, Sergei V.
Far Eastern State Technical Fisheries University
52B Lugovaya Str., Vladivostok, 690087, Russian Federation
e-mail: *aleksey902@mail.ru*
Chekhranov, Sergei V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Far Eastern State Technical Fisheries University
52B Lugovaya Str., Vladivostok, 690087, Russian Federation
e-mail: *turboroom@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2021 г.
Received: February 25, 2021.