

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ НА ВЫХОДЕ ИЗ ТЯГОВОГО СОПЛА СТРУЙНО-РЕАКТИВНОЙ ТУРБИНЫ

DETERMINATION OF VELOCITY OUTPUT OF THE TRACTION NOZZLE OF THE JET-REACTIVE TURBINES

Одним из примеров энергосбережения является применение струйно-реактивной турбины для утилизации энергии сжатых газов, например, в системах добычи, транспортировки и распределения природного газа. В данной работе исследовано течение газа в проточной части и получены некоторые параметры струйно-реактивной турбины с помощью современного программного комплекса FlowVision. Для получения конечных результатов расчета для ступени струйно-реактивной турбины в среде FlowVision исследовались: различные типы граничных условий и их значения, уровни адаптации, шаги по времени. По результатам вышеуказанных исследований проведено сравнение полученных результатов во FlowVision с результатами расчета по одномерной теории течения газа. Данная статья посвящена расчету течения газа и построению характеристик струйно-реактивной турбины с помощью программного комплекса FlowVision.

Ключевые слова: струйно-реактивная турбина, питающее сопло, ротор, математическая модель, численное моделирование, экспериментальные зависимости.

Введение

Как известно, в настоящее время мировая тенденция направлена на решение проблемы энергосбережения всеми доступными путями. Эта задача является первоочередной, актуальной и весьма непростой в реализации. Одним из путей решения является утилизация вторичных энергоресурсов, в частности замена процесса дросселирования газов и паров на редукторах и регуляторах давления процессом расширения их в турбине. С вала турбины энергия может быть использована для привода каких-либо машин (насосов, компрессоров, вентиляторов) или преобразована в электрическую энергию с помощью генератора.

Данная ситуация имеет место в газовой промышленности на газораспределительных станциях и пунктах (ГРС и ГРП), в различных технологических процессах в химической и других отраслях промышленности, в коммунально-бытовом хозяйстве.

Чтобы решить эту проблему было предложено в качестве альтернативы лопаточным турбинам использовать для малых турбодетандерных электрогенераторных агрегатов безлопаточную струйно-реактивную турбину в диапазоне мощностей от 50 до 500–700 кВт. Она проста в конструктивном плане и имеет возможность быть освоеной любым производством, включая малые предприятия. Её стоимость примерно на порядок меньше стоимости классических лопаточных турбин. Струйно-реактивная турбина представляет собой развитие сегнерова колеса, и её можно отнести к новому классу

турбин, т.к. она отличается по термодинамическому процессу, а её эффективность (изоэнтропийный КПД) по сравнению с сегнеровым колесом возрастает в несколько раз, и по мере отработки конструкции её характеристики постоянно улучшаются. По конструкции она относится к безлопаточным турбинам с одиночным подводным соплом, а по кинематике потока — к центробежным реактивным.

Схема струйно-реактивной турбины, которая применяется в турбодетандерных агрегатах, представлена на рисунке 1. Конструктивно струйно-реактивная турбина очень проста. Она содержит ротор, состоящий из полого вала и рабочего колеса, выполненного в виде одной, двух или более радиальных сопловых трубок, консольно закрепленных (приваренных) на валу, на свободном конце которых имеются тангенциально направленные тяговые сопла. Полости вала и сопловых трубок соединены и образуют непрерывный газовый тракт от торцевого входа в осевой канал вала до тяговых сопел. Струйно-реактивная турбина в данном исполнении в отличие от лопаточных турбин, вообще не имеет каких бы то ни было быстро изнашиваемых контактных или малозазорных лабиринтных уплотнений. Подвод газа в тракт ротора струйно-реактивной турбины осуществляется посредством питающего сопла с образованием недорасширенной сверхзвуковой струи. Струя, расширяясь, входит в тракт ротора через осевой зазор (уплотнения отсутствуют), и перекрывает его, устраняя из него утечку рабочего тела. После скачка уплотнения поток тормозится в дозвуковом

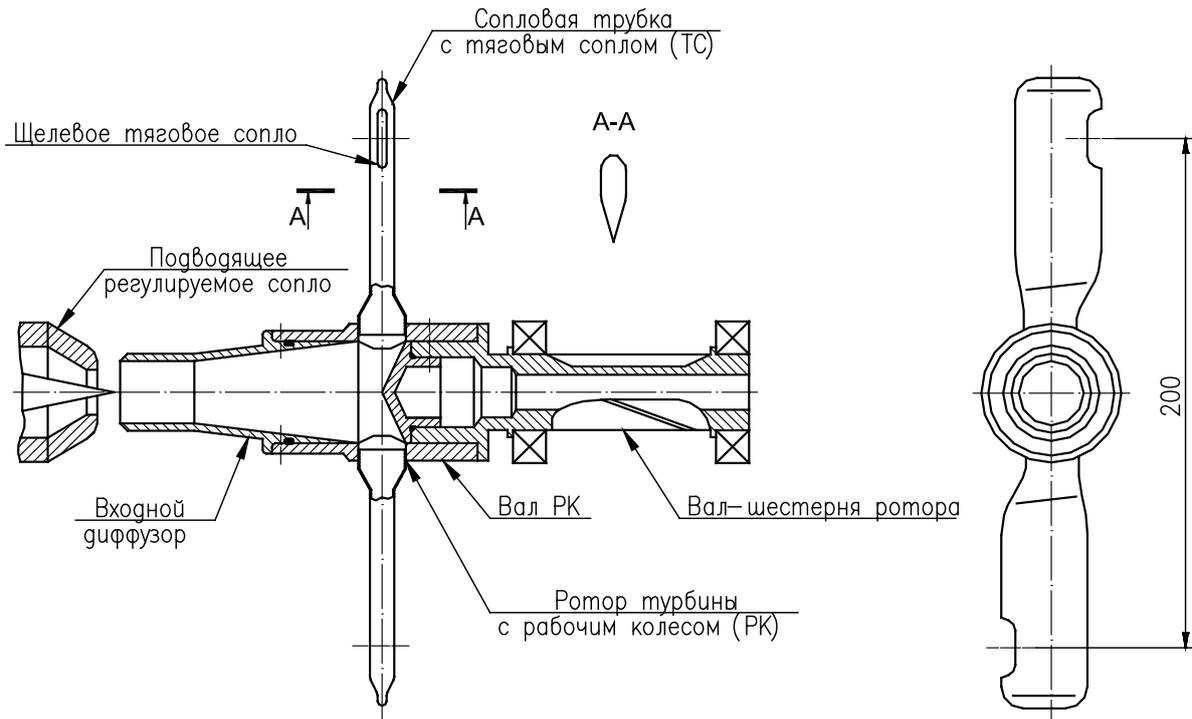


Рисунок 1 — Схема струйно-реактивной турбины

диффузоре и входит в каналы рабочего колеса с небольшой скоростью и, соответственно, малыми потерями. Истечение газа из тягового сопла образует реактивную тягу и крутящий момент на валу струйно-реактивной турбины, а при вращении вала совершается механическая работа.

Таким образом, принцип действия струйно-реактивной турбины заключается в преобразовании потенциальной энергии сжатого газа в кинетическую энергию сверхзвуковой струи, истекающей из тягового сопла. Этот процесс является основным и происходит в тяговом сопле.

Регулирование режимов работы струйно-реактивной турбины производится путём перемещения центрального штока (иглы) подводящего сопла, который изменяет площадь критического сечения, т.е. меняется только расход без потери давления на дросселирование.

Постановка задачи

Прообразом струйно-реактивной турбины является изобретенное венгерским ученым Сегнером турбинное колесо, названное в его честь. Теория струйно-реактивной турбины (сегнерова колеса) рассмотрена в ряде работ [1, 2, 3, 4, 5]. Однако, на сегодняшний день, в эпоху информационных технологий, недостаточно исследованы характеристики струйно-реактивной турбины с помощью программно-вычислительных комплексов.

В последних публикациях [6, 7] исследована проблема волнового кризиса на профилях консолей турбины и предложены рекомендации по исключению работы струйно-реактивной турбины в зоне волнового кризиса.

В работах [8, 9] выполнено моделирование и расчет течения газа в проточной части струйно-реактивной турбины на пусковом режиме работы с помощью программного комплекса *FlowVision*. Относительная погрешность результатов вычислений между физическим и вычислительным экспериментами составляет менее 3%, что свидетельствует о целесообразности применения программных комплексов.

Вычислительный эксперимент может стать очень удобной и перспективной альтернативой физическому эксперименту, поскольку позволяет сократить время исследования и повысить экономический эффект.

В настоящее время остается открытым вопрос моделирования течения газа при вращении ротора струйно-реактивной турбины.

В данной статье исследовано течение газа в проточной части струйно-реактивной турбины с определением скорости на выходе из тягового сопла турбины и проведено сравнение полученных результатов с результатами расчета по одномерной теории [10].

Основная часть и обоснование полученных результатов

Для расчета течения газа в программном комплексе *FlowVision* создана твердотельная модель проточной части экспериментальной струйно-реактивной турбины (ступени «Питательное сопло + рабочее колесо»), с диаметром критического сечения питающего сопла 5,2 мм, которая показана на рисунке 2.

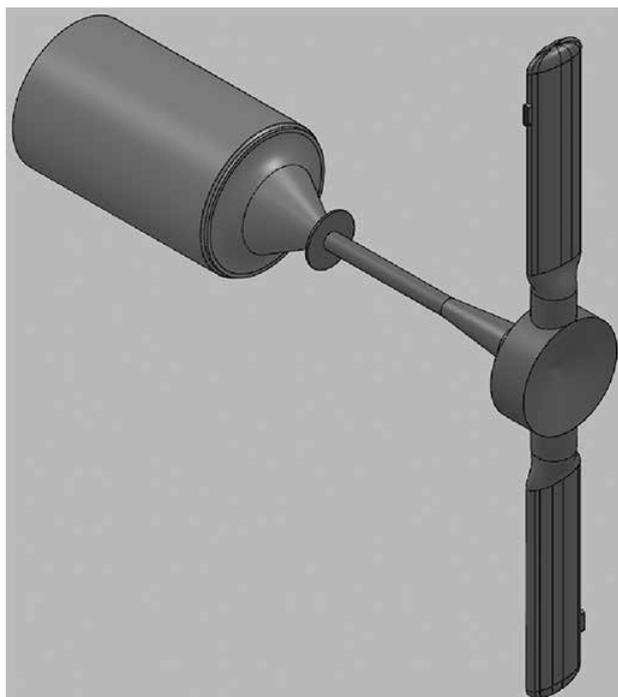


Рисунок 2 — Общий вид и разрез твердотельной модели проточной части струйно-реактивной турбины

Расчет течения газа в ступени турбины проводился по заданным полным параметрам: избыточному давлению (300000 Па) и температуре (288 К) воздуха на входе в питающее сопло. Расчет проводился с заданием частоты вращения ротора струйно-реактивной турбины, которое происходило ступенчато: 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 об/мин.

Процесс расчета потока газа контролировался по графикам сходимости различных параметров, до выхода расчета на стационарный режим. На рисунке 3 построены графики сходимости абсолютной и относительной скорости при частотах вращения ротора 2000, 4000, 8000 и 16000 об/мин.

После завершения расчета можно визуальнo оценить процесс течения газа, т.е. изменение контролируемых параметров вдоль проточной части турбины. Пример визуализации по скорости при частоте вращения ротора струйно-реактивной турбины $n = 16000$ об/мин, показан на рисунке 4.

Из рисунка 4 видно, что переход потока со сверхзвукового режима на дозвуковой происходит в скачках уплотнения на входном участке ротора.

По результатам расчетов течения газа в программном комплексе *FlowVision* и с помощью одномерной теории построены графические зависимости абсолютной и относительной скорости на выходе их тягового сопла от частоты вращения ротора струйно-реактивной турбины (рисунки 5, 6).

При расчете по одномерной теории для определения скоростей на выходе из тягового сопла используются следующие формулы.

Абсолютная скорость газа на срезе тягового сопла определяется по формуле

$$C_{ср.т} = W_{ср.т} - U, \quad (1)$$

где $W_{ср.т}$ — относительная скорость газа на срезе тягового сопла, $U = \frac{\pi D n}{60}$ — окружная скорость потока газа на срезе тягового сопла при условии, что его центр среза расположен на расстоянии $D/2$ от оси вращения, n — частота вращения ротора струйно-реактивной турбины.

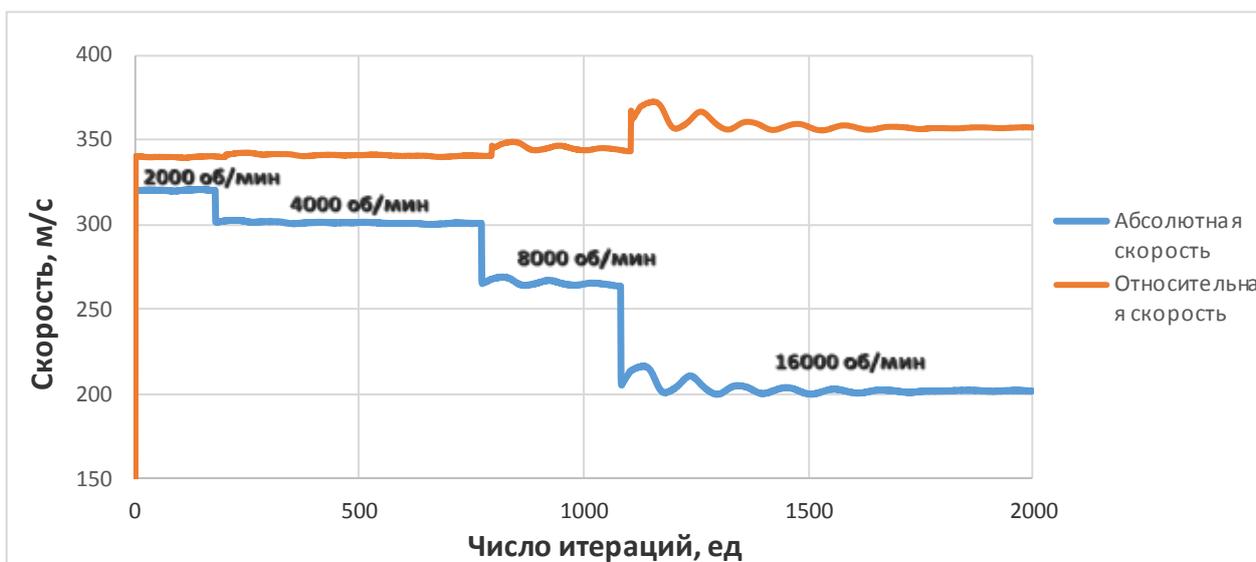


Рисунок 3 — Сравнение графиков сходимости абсолютной и относительной скорости при частоте вращения ротора 2000, 4000, 8000 и 16000 об/мин

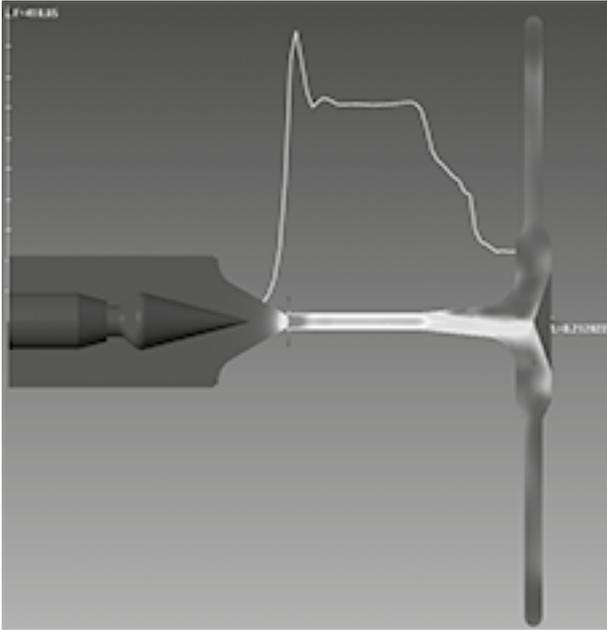


Рисунок 4 — Изменение скорости на осевом участке проточной части струйно-реактивной турбины в виде двухмерного графика и заливки при частоте вращения ротора 16000 об/мин

Относительная скорость газа на срезе тягового сопла определяется следующей формулой:

$$W_{\text{т.д.}} = (\lambda_{\text{т.д.}})_{n=0} \sqrt{\frac{2k}{k+1} R \left(T_T^* + \frac{k-1}{2kR} U^2 \right)} =$$

$$= (\lambda_{\text{т.д.}})_{n=0} \sqrt{a_{\text{т.д.}}^2 + \frac{k-1}{k+1} U^2} = \sqrt{(C_{\text{т.д.}}^2)_{n=0} + \frac{k-1}{k+1} (\lambda_{\text{т.д.}}^2)_{n=0} U^2}$$

где $(\lambda_{\text{ср.т.}})_{n=0}$ — безразмерная скорость потока газа на выходе из тягового сопла в относительном движении на пусковом режиме, k — показатель изоэнтропы (адиабаты) газа, R — удельная газовая постоянная для газа, $T_{\text{т.д.}}^*$ — температура торможения на входе в турбину, $a_{\text{кр.т.}}$ — критическая скорость на срезе питающего сопла, $(C_{\text{ср.т.}}^2)_{n=0}$ — скорость газа на срезе тягового сопла в пусковом режиме.

Выводы

По результатам работы и проведенных исследований необходимо отметить следующее:

1. Выполнено моделирование и расчет течения газа в проточной части струйно-реактивной турбины с помощью программного комплекса *FlowVision* как на пусковом

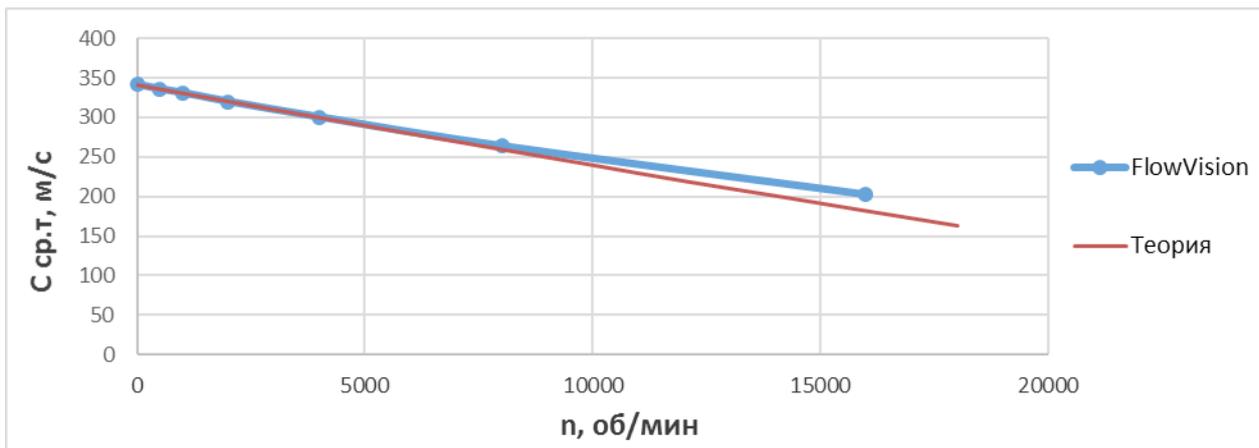


Рисунок 5 — Сравнение характеристик абсолютной скорости, полученных с помощью одномерной теории и комплекса *FlowVision*

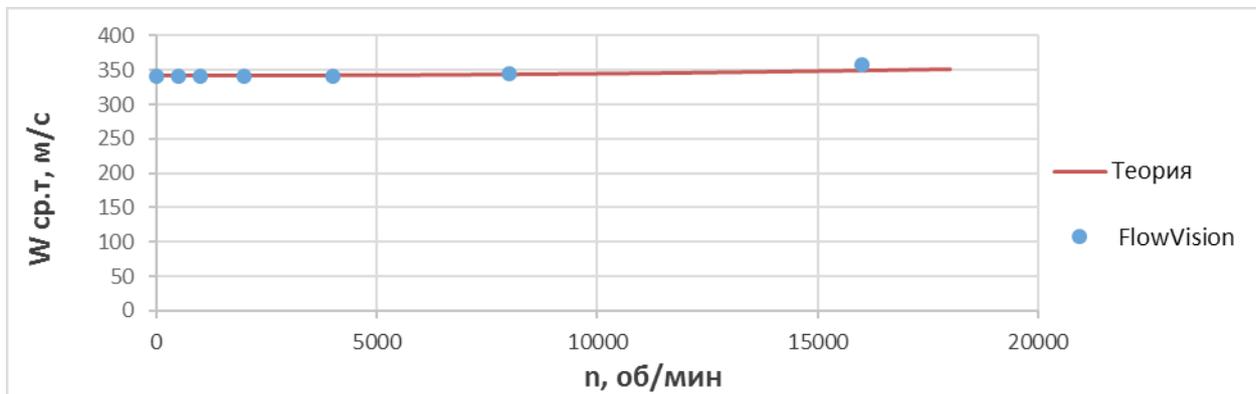


Рисунок 6 — Сравнение характеристик относительной скорости, полученных с помощью одномерной теории и комплекса *FlowVision*

режиме так и при вращении ротора струйно-реактивной турбины. Было установлено, что приемлемая точность результатов обеспечивается при следующих условиях расчета:

- адаптация входа в питающее сопло — 1 уровень, адаптация выхода из тяговых сопел — 2 уровень, адаптация выхода из питающего сопла, зазора между статором и ротором — 2 уровень, с применением адаптации по объему с максимальным уровнем 3,

- шаг расчета по времени КФЛ 50.

2. Достаточно хорошее совпадение результатов расчета по одномерной теории течения газа и с помощью программного комплекса *FlowVision* (относительная погрешность менее 5%).

3. Вычислительный эксперимент может стать очень удобной и перспективной альтернативой физическому эксперименту, что позволит сократить время исследования и повысить экономический эффект.

4. Планируются дальнейшие исследования и разработки в этом направлении, которые будут сосредоточены на следующем:

- применение программного комплекса *FlowVision* для исследования струйно-реактивной турбины при вращении ротора в среде вязкого газа.

- сравнении результатов, полученных экспериментальным путем с расчетом в программном комплексе *FlowVision*.

Литература

1. Саяпин, В.В. Оптимизация параметров пневмопривода со струйным двигателем / В.В. Саяпин // Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления. — М.: Машиностроение, 1984. — Вып. 10. — С. 58—63.

2. Саяпин, В.В. Оптимизация параметров струйного двигателя по критерию минимума расхода газа / В.В. Саяпин, И.А. Марочкина // Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления. — М.: Машиностроение, 1987. — Вып. 13. — С. 96—102.

3. Чашин, В. А. Пневмопривод систем управления летательных аппаратов [Текст] / В.А. Чашин, О.Г. Камладзе, А.Б. Кондратьев и др. — М.: Машиностроение, 1987. — 248 с.

4. Струйно-реактивный двигатель и возможности его использования / [С.М. Ванеев и др.] // Химическое и нефтяное машиностроение. — 1990. — № 6. — С. 16—17.

5. Кириллов, И.И. Теория турбомашин. / И.И. Кириллов, А.И. Кириллов. — Л.: Машиностроение, 1974. — 320 с.

6. Ванеев, С.М. Исследование струйно-реактивной турбины для турбодетандерного агрегата / С.М. Ванеев, В.В. Гетало, С.К.Королев // Вестник НТУ «ХПИ» Энергетические та теплотехнические процессы и установки — 2012. — №36. — С. 82—90.

7. Гетало, В.В. Вдосконалення систем редукування тиску шляхом використання струминно-реактивних пневмоагрегатів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.17 «Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати» / В.В. Гетало. — Суми, 2014. — 23 с.

8. Исследование струйно-реактивной турбины для турбодетандеров в системах редуцирования газа / [С.М. Ванеев и др.] // Материалы VIII международной научно-технической конференции посвященной 90-летию Одесской государственной академии холода: Устойчивое развитие и искусственный холод, 8-10 октября 2012 года. — 2012. — С. 386—390.

9. Исследование неревверсивной струйно-реактивной турбины для турбодетандера с помощью программного комплекса *FlowVision* / [С.М. Ванеев и др.] // Компрессорное и энергетическое машиностроение. — 2012. — № 3(29). — С. 22—28.

10. Ванеев, С.М. Расчет характеристик струйно-реактивной турбины // Вестник НТУУ «КПИ». — К.: Машиностроение, 1999. — С. 263—269.

11. Ванеев, С.М. Структура потерь энергии и КПД струйно-реактивной газовой турбины // Вісник Сумського державного університету. Серія технічні науки. — 2001. — № 9(30)—10(31). — С. 207—214.

References

1. Sayapin, V.V. Optimizaciya parametrov pnevmoprivoda so struynym dvigatelem // Pnevmatika i gidravlika. Privody i sistemy upravleniya. — M: Mashinostroenie, 1984. — S. 58—63

2. Sayapin, V. V. Optimizaciya parametrov struynogo dvigatelya po kriteriyu minimuma rashoda gaza // Pnevmatika i gidravlika. Privody i sistemy upravleniya. — M: Mashinostroenie, 1987. — No. 13. — S. 96—102.

3. Chashchin, V.A. et al. Pnevmoпривод систем управления летательных аппаратов. — М.: Mashinostroenie, 1987. — 248 s.

4. Vaneev, S.M., et al. Struyno-reaktivnyj dvigatel i vozmozhnosti ego ispolzovaniya. — Himicheskoe i neftyanoe mashinostroenie 6 (1990): 16—17. Print.

5. Kirillov, I. I., Kirillov, A. I. Theoria Turbomachin. — L: Mashinostroenie, 1974. — 320 s.

6. Vaneev, S.M., V.V. Getalo and S.K. Korolev. Issledovanie strujno-reaktivnoj turbiny dlya turbodetandernogo agregata. Energetychni ta teplotehnichni procesy j ustatkuvannya. Visnyk NTU «HPI». No. 8. Kharkiv: NTU «HPI», 2012. 82—90 s.

7. Getalo, V.V. Vdoskonalennya system redukovannya tisku shlyakhom vikoristannya struminno-reaktivnikh pnevmoagregativ: avtoref. dis. na zdobuttya nauk stupenya kand. tekhn. nauk: spets. 05.05.17 Gidravlichni mashini ta gidropnevmoagregati. Getalo V. V. Sumy, 2014. 23 s.

8. Vaneev, S.M., et al. Issledovanie struynoreaktivnoj turbiny dlya turbodetanderov v sistemakh reducirovaniya gaza. Materialy VIII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy

konferencii, posvyashchennoy 90-letiyu Odesskoy gosudarstvennoy akademii holoda: Ustoychivoye razvitiye i iskusstvenniy holod, 8-10 oktyabrya 2012 goda. — 386—390 s.

9. Vaneev, S.M., et al. Issledovanie nereversivnoy struyno-reaktivnoy turbiny dlya turbodetandera s pomoshchyu programmnoy kompleksa FlowVision. Kompessornoye i energeticheskoe mashinostroenie 3(29)—2012. — 22—28 s.

10. Vaneev, S.M. Raschet kharakteristik struyno-reaktivnoy turbiny. Vestnik NTUC «KPI». — K.: Mashinostroenie, — 1999. — 263—269. Print.

11. Vaneev, S.M. Struktura poter energii i KPD strujno-reaktivnoy gazovoy turbiny. — Visnik Sumskogo derzhavnogo universitetu. Seriya tekhnichni nauki.— Sumy: 2001. 207—214 s.

Надійшла 25.01 2015 року

УДК 621.438.2

Дослідження характеристик експериментальної струминно-реактивної турбіни за допомогою програмного комплексу FlowVision.

С.М. Ванєєв, Ю.Ю. Усік

Одним із прикладів енергозбереження є застосування струминно-реактивної турбіни для утилізації енергії стиснутих газів: наприклад, у системах видобутку транспортування і розподілу природного газу. Досліджено течію газу у проточній частині та отримані деякі параметри струминно-реактивної турбіни за допомогою сучасного програмного комплексу *FlowVision*. Для

отримання кінцевих результатів розрахунку для ступеня струминно-реактивної турбіни у середовищі *FlowVision* досліджувалися: різні типи граничних умов та їх значення, рівні адаптації, кроки за часом. За результатами вищевказаних досліджень наведено порівняння отриманих результатів у *FlowVision* з результатами розрахунку за одномірною теорією течії газу.

Ключові слова: струминно-реактивна турбіна, математична модель, ротор, тягове сопло, експериментальні залежності.

UDK 621.438.2

Determination of velocity output of the traction nozzle of the jet-reactive turbines

S.M. Vanyeyev, Y.Y. Usik

One example of energy saving is the use jet-reactive turbine for energy recovery from the compressed gas, for example, in the extraction systems, transportation and distribution of natural gas. In this article we studied the gas flow in the flowing part and get some of the parameters of the jet-reactive turbine with a modern software system *FlowVision*. In order to get the final results of calculations for the stage jet-reactive turbine in the medium *FlowVision* investigated: various types of boundary conditions and their values, the levels of adaptation, time steps. According to the results of the above studies presented a comparison of the results obtained in *FlowVision* with the results of calculation of the one-dimensional theory of gas flow.

Keywords: jet-reactive turbine, rotor, comparison of the results, distribution of natural gas,