

УДК 621.438.2.018-047.58

doi: 10.32620/aktt.2020.1.04

С. М. ВАНЕЕВ¹, Н. И. РАДЧЕНКО², С. С. МЕЛЕЙЧУК¹, В. Н. БАГА¹,
Т. С. РОДИМЧЕНКО¹

¹ Сумський державний університет, Україна

² Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУЙНО-РЕАКТИВНОЙ ТУРБИНЫ

Целью работы является отработка методики исследования течения газа в проточной части ступени струйно-реактивной турбины, состоящей из подводящего сопла и рабочего колеса, с применением программного комплекса FlowVision, а также расчет параметров и характеристик этой ступени. В процессе моделирования и исследований использовалось и проверялось большое количество типов граничных условий, начальных сеток и уровней адаптации, шагов расчета по времени и т.д.

Представлены результаты расчетов энергетических характеристик струйно-реактивной турбины при заданных давлении и температуре заторможенного потока на входе в ступень 701325 Па (избыточное давление - 600000 Па) и 288 К соответственно и статическом давлении на выходе из ступени 101325 Па. Получены характеристики турбины на окружности рабочего колеса, то есть без учета момента аэродинамического сопротивления при вращении ротора турбины в среде вязкого газа. Основным параметром, необходимым для расчета мощности и КПД турбины, является момент. В статье показано, что окружной (движущий) момент струйно-реактивной турбины при расчетах с помощью программного комплекса FlowVision может быть определен несколькими способами, по результатам рассчитанных параметров, выводимых в информационном окне. Сравнение значений движущего момента, полученного разными способами, в том числе и по одномерной теории, показало, что они отличаются незначительно: в пределах до 12 %. Приведены зависимости изменения этого момента от частоты вращения ротора. Получены значения окружной мощности и окружного КПД от частоты вращения ротора и проведено их сравнение с результатами расчета этих зависимостей по одномерной теории при расчетном и нерасчетном режимах истечения из тягового сопла. Наибольшие значения окружной мощности и окружного КПД достигаются в диапазоне значений частоты вращения 24000-26000 об/мин; максимальные значения КПД находятся в диапазоне 45-48 %.

Верификация полученных результатов выполнена по зависимости момента на пусковом режиме от давления на входе в струйно-реактивную турбину путем сравнения результатов расчетов в программном комплексе FlowVision с экспериментальными данными и с результатами расчета по одномерной теории. Показано, что предложенная методика является наиболее достоверной с точки зрения адекватности происходящих процессов внутри машины и наименее временнзатратной с точки зрения выхода расчета на стационарный режим.

Ключевые слова: струйно-реактивная турбина; проточная часть; моделирование; программный комплекс; момент; мощность; коэффициент полезного действия.

1. Анализ проблемы и постановка цели исследования

Одним из путей энергосбережения является использование (утилизация) вторичных энергоресурсов, в частности утилизация энергии сжатых газов и паров, которые дросселируются на редукторах и регуляторах давления на газораспределительных станциях и газораспределительных пунктах в газовой промышленности в различных технологических процессах в химической и других отраслях промышленности, в коммунально-бытовом хозяйстве [1, 2].

Эту задачу можно решить путем применения турбодетандерных агрегатов (ТДА) малой и средней единичной мощности (50 ... 500 кВт), создаваемых на

базе струйно-реактивной турбины (СРТ), простых и компактных по конструкции, обеспечивающих возможность их установки непосредственно вместо систем редуцирования давления или параллельно с ними [3].

Для исследования течения рабочего тела в проточной части машин, а также расчета их параметров и характеристик в настоящее время широко применяются различные программные комплексы.

Цель работы – отработка методики расчета и исследование течения газа в проточной части ступени (подводящее сопло + рабочее колесо) струйно-реактивной турбины при помощи программного комплекса FlowVision.

Основными задачами работы являются:

- проведение расчетов течения газа в проточной части СРТ при помощи программного комплекса FlowVision;
- расчет параметров и характеристик СРТ на основании полученных данных.

2. Результаты исследования

Продольный разрез исследуемой струйно-реактивной турбины, твердотельная модель проточной части и расчетная сетка показаны на рис. 1.

Размеры проточной части следующие:

- диаметр выходного сечения подводящего сопла - 5,2 мм;
- диаметр входного сечения осевого канала ротора - 6,2 мм;
- эквивалентный диаметр щелевых тяговых сопел – 6,2 мм;
- диаметр по центрам выходных сечений тяговых сопел – 200 мм.

Рабочее тело – воздух.

Выполнен расчет параметров и характеристик СРТ для ступени «подводящее сопло + рабочее колесо» при задании давления и температуры заторможенного потока (т. е. полных параметров) на входе в ступень: $P_{вх} = 701325$ Па ($P_{вх.изб} = 600000$ Па, $P_{окр.ср} = 101325$ Па); $T_{вх} = 288$ К.

Постоянными исходными данными являются: модель расчета – полностью сжимаемая жидкость; базовые (опорные) величины:

- температура $T_{оп} = T_{окр.ср} = 273$ К;
- давление $P_{оп} = P_{окр.ср} = 101325$ Па.

На рис. 2 показаны зависимости пускового момента на валу СРТ от избыточного давления на входе в питающее сопло, полученные экспериментально, рассчитанные с помощью одномерной теории и программного комплекса FlowVision. Следует отметить, что подводящее устройство (сопло) при расчете в комплексе было выполнено более простым, с осевым подводом газа, поэтому потери в нем были меньше, чем в реальном устройстве.

Из рисунка 3 видно, что результаты расчетов в FlowVision и по одномерной теории близки к результатам, которые были получены на экспериментальном стенде. При этом коэффициент расхода реального подводящего устройства исследуемой турбины составляет 0,9, а коэффициент расхода твердотельной модели с осесимметричным подводом газа, на основании которой производился расчет в комплексе FlowVision, составляет 0,95. Из рисунка видно, что наиболее близко к экспериментальным данным находятся данные расчета по одномерной теории при коэффициенте расхода $\mu = 0,9$, а результаты расчета при $\mu = 0,95$ практически совпали с результатами расчета FlowVision.

Далее расчет проводился с заданием частоты вращения ротора СРТ, которое проходило ступенчато: 40000 об/мин., 32000 об/мин., 24000 об/мин., 16000 об/мин., 8000 об/мин., 4000 об/мин., 2000 об/мин., 1000 об/мин. В результате расчета определяются скорости, давления, температуры, расход газа и моменты по длине проточной части, а также в характерных сечениях струйно-реактивной турбины.

Момент на валу СРТ определяется по теореме об изменении момента количества движения потока газа относительно оси вращения с учетом нерасчетности тягового сопла и аэродинамического сопротивления окружающей среды при вращении ротора:

$$M_T = M'_U + M_{нер} - M_{с.в} = M_U - M_{с.в},$$

где M'_U – момент, обусловленный взаимодействием потока газа с элементами проточной части СРТ, равен моменту количества движения массы газа вытекающей из тягового сопла; $M_{нер}$ – момент, обусловленный разностью давлений на срезе тягового сопла и в окружающей среде (момент от нерасчетности тягового сопла); $M_{с.в}$ – момент сопротивления

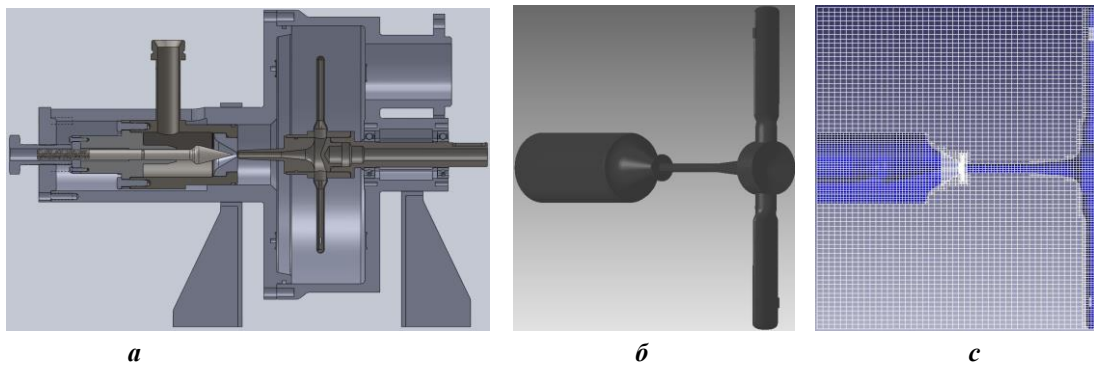


Рис. 1. Исследуемая струйно-реактивная турбина: *a* – продольный разрез; *б* – твердотельная модель проточной части; *с* – расчетная сетка

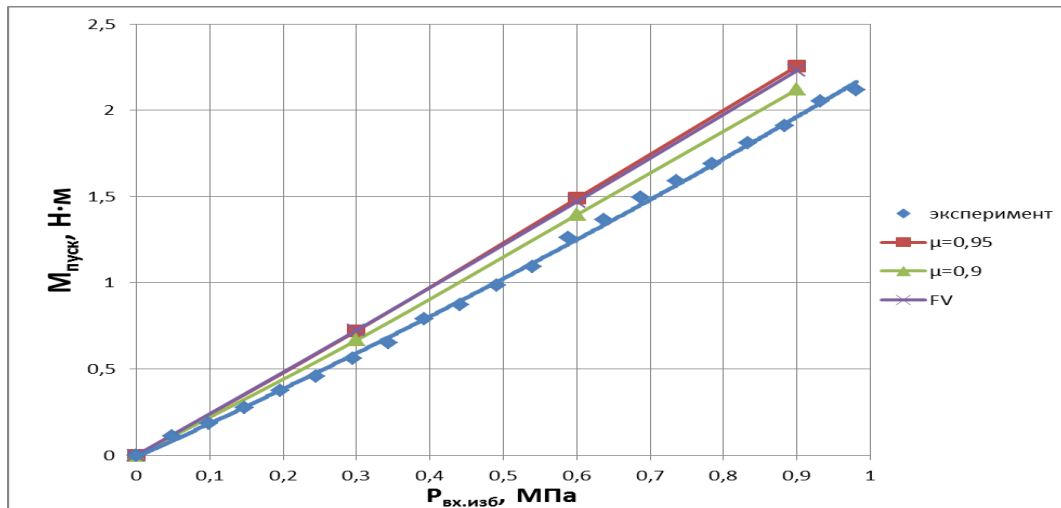


Рис. 2. Зависимость пускового момента от избыточного давления на входе в подводящее сопло

вращению ротора в окружающей среде (момент аэродинамического сопротивления вращающегося ротора); M_U – окружной (движущий) момент СРТ:

$$M_U = \left[G_T (W_{ср.т} - U) + f_{ср.т} (P_{ср.т} - P_{окр.ср}) \right] \frac{D}{2},$$

где G_T – расход газа через тяговое сопло; $W_{ср.т}$ – скорость газа на срезе (в выходном сечении) тягового сопла в относительном движении; U – окружная скорость газа в центре среза тягового сопла; $P_{ср.т}$ – статистическое давление на срезе тягового сопла; $P_{окр.ср}$ – давление в окружающей среде, Па; D – диаметр рабочего колеса (диаметр расположения центров среза тяговых сопел); $f_{ср.т}$ – площадь выходного сечения тягового сопла

$$M_T = M_U.$$

Без учета момента сопротивления вращению ротора в окружающей среде момент на валу турбины равен окружному моменту:

По этим формулам определяется момент в методике расчета характеристик СРТ по одномерной теории.

Окружной крутящий момент по результатам расчета параметров в комплексе FlowVision можно определить несколькими методами:

1. По моменту на стенке рабочего колеса:

$$M_{у1} = M_{стенк} + f_{ср.т} \cdot P_{расч} \cdot \frac{D}{2},$$

где $M_{стенк}$ – момент на стенке рабочего колеса, рассчитанный в комплексе FlowVision; $P_{расч}$ – величина давления в выходном сечении тягового сопла, которая рассчитывается в комплексе FlowVision и отображается в информационном окне.

2. Через значение скорости на выходе из тягового сопла в абсолютном движении $C_{ср.т}$:

$$M_{у2} = \left[G_T \cdot C_{ср.т} + f_{ср.т} \cdot P_{расч} \right] \frac{D}{2}.$$

3. Через значение окружной (тангенциальной) скорости на выходе из тягового сопла в абсолютном движении C_u :

$$M_{у3} = G_T \cdot C_u \cdot L + f_{ср.т} \cdot P_{расч} \cdot \frac{D}{2},$$

где L – плечо приложения окружной (тангенциальной) скорости.

Расчет окружного крутящего момента проводился также по одномерной теории с помощью прикладной программы. Результаты расчетов в виде графических зависимостей окружного крутящего момента от частоты вращения ротора показаны на рис. 3.

Окружные моменты, определенные разными способами, отличаются незначительно (до 12,1 %).

Окружная мощность определяется по формуле

$$N_u = M_{у3} \cdot \omega = M_{у3} \cdot \frac{\pi n}{30},$$

где $\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30}$ – угловая скорость, c^{-1} .

Окружной КПД определяется по формуле:

$$\eta_u = \frac{N_u}{N_s} = \frac{N_u}{G_n \cdot h_s},$$

где G_n – массовый расход газа через подводящее сопло (берется из расчета в комплексе FlowVision); h_s – изоэнтропная работа расширения 1 кг рабочего тела от параметров торможения на входе СРТ.

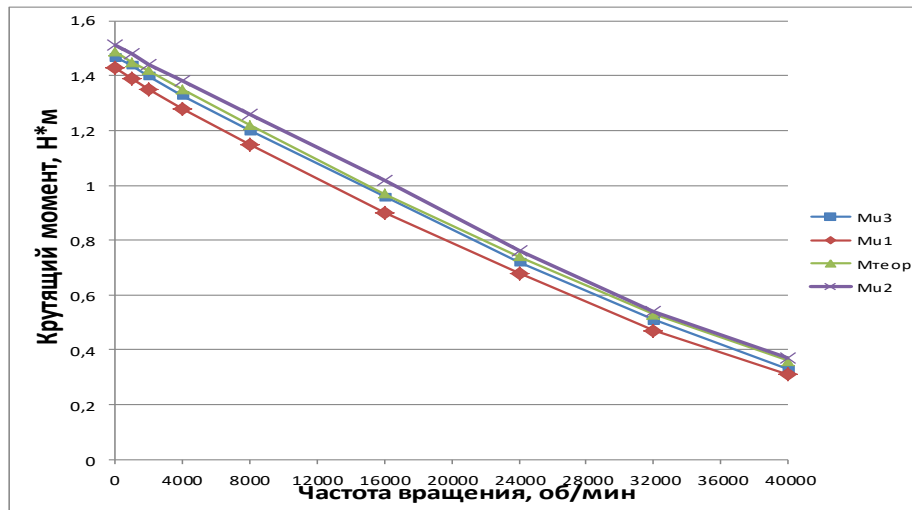


Рис. 3. Изменение величины окружного крутящего момента в зависимости от частоты вращения ротора

Значения окружной мощности и окружного КПД также рассчитывались по одномерной теории при расчетном и нерасчетном режиме истечения из тягового сопла. Расчетным называется такой режим работы сопла, при котором давление в выходном сечении сопла равно давлению в среде, в которую происходит истечение.

Изменение величины окружной мощности и окружного КПД от частоты вращения в графическом виде представлены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что при расчете в комплексе FlowVision наибольшие значения окружной мощности и окружного КПД достигаются в диапазоне

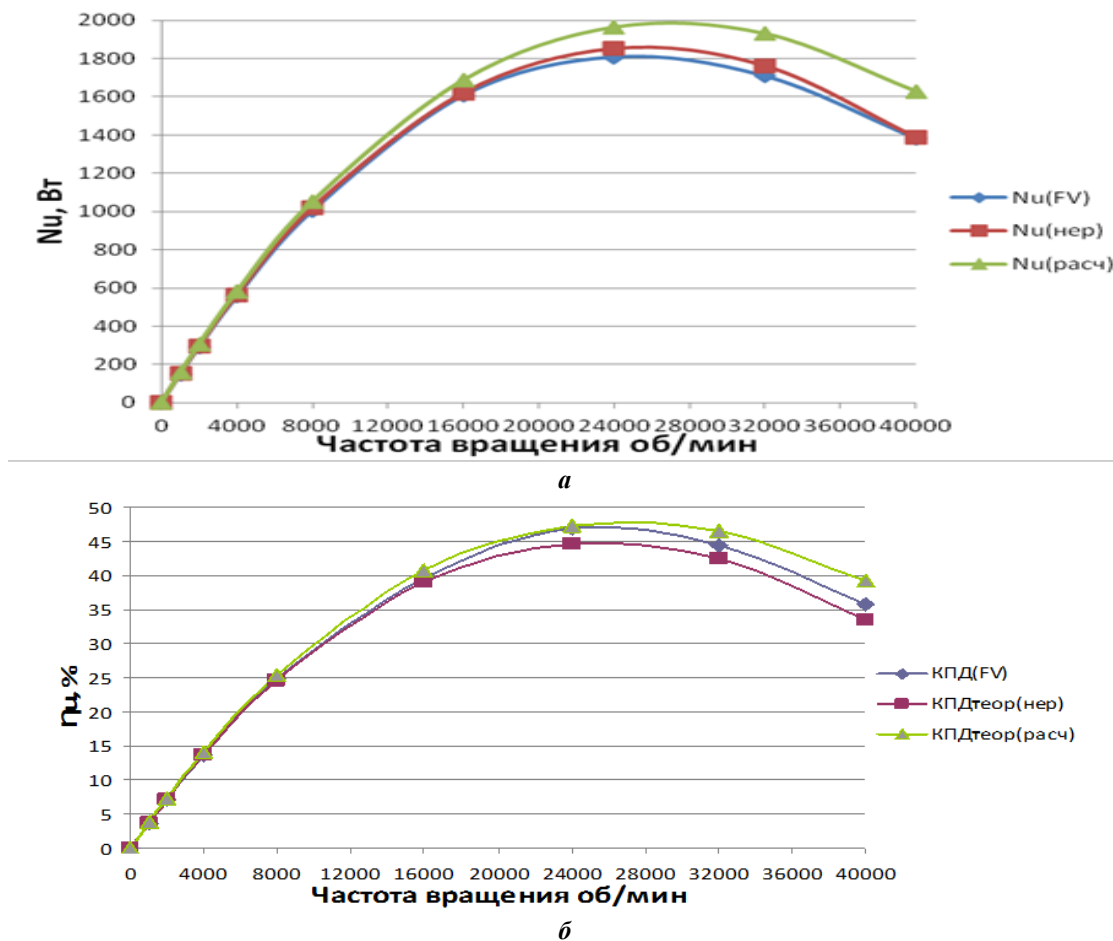


Рис. 4. Изменение величины окружной мощности и окружного КПД СРТ от частоты вращения ротора:
 а – окружная мощность; б – окружной КПД

значений частоти вращения 24000-26000 об/мин. Максимальные значения КПД находятся в диапазоне 45-48 %.

Выводы

Выполнено моделирование течения газа в проточной части струйно-реактивной турбины с помощью программного комплекса FlowVision.

В ходе проведения вычислительных исследований, отработана методика расчета параметров и характеристик струйно-реактивных турбин с помощью этого комплекса (выбор типов граничных условий, начальных сеток и уровней адаптации, шагов расчета по времени и т.д.).

Сравнение результатов расчетов параметров и характеристик струйно-реактивных турбин с помощью программного комплекса с экспериментальными данными и с результатами расчета по одномерной теории показало высокую степень их совпадения. Погрешность определения основных параметров численным методом не превышает 5 %.

Литература

1. Singh, P. *The choice between turbine expanders and variable speed pumps as replacement for throttling devices in non-thermal process applications [Text] / P. Singh // Energy. – 2017. – Vol. 123. – P. 198-217. DOI: 10.1016/j.energy.2017.01.124.*
2. Cleveland, T. *Energy Recovery At Pressure Regulating Stations [Text] / T. Cleveland, S. Mokhatab // Pipeline & Gas Journal. – 2014. – Vol. 241, No. 6.*
3. Vanyeyev, S. *Jet-Reactive Turbine: Experimental Researches and Calculations by Means of Softwares [Text] / Sergej Vanyeyev, Viktor Getalo // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 630. – P. 66–71.*

References

1. Singh, P. The choice between turbine expander and variable speed pumps as replacement for throttling devices in non-thermal process applications. *Energy*, 2017, vol. 123, pp. 198-217. DOI: 10.1016/j.energy.2017.01.124.
2. Cleveland T., Mokhatab S. Energy Recovery At Pressure Regulating Stations. *Pipeline & Gas Journal*, 2014, vol. 241, no. 6.
3. Vanyeyev, S., Getalo, V. Jet-Reactive Turbine: Experimental Researches and Calculations by Means of Softwares. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 630, pp. 66-71.

Поступила в редакцію 20.12.2019, рассмотрена на редколлегии 20.01.2020

МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУМІННО-РЕАКТИВНОЇ ТУРБИНИ

С. М. Ванєєв, М. І. Радченко, С. С. Мелейчук, В. М. Бага, Т. С. Родимченко

Метою роботи є відпрацювання методики дослідження течії газу в проточній частині ступеня струмінно-реактивної турбіни, що складається з підвідного сопла і робочого колеса, із застосуванням програмного комплексу FlowVision, а також розрахунок параметрів і характеристик цього ступеня. В процесі моделювання і досліджень використовувалася і перевірялася велика кількість типів граничних умов, початкових сіток і рівнів адаптації, кроків розрахунку за часом тощо. Представлені результати розрахунків енергетичних характеристик струмінно-реактивної турбіни при заданих тиску і температурі загальмованого потоку на вході в ступінь 701325 Па (надлишковий тиск – 600000 Па) і 288 К відповідно та статичному тиску на виході зі ступеня 1010325 Па. Отримані характеристики турбіни на окружності робочого колеса, тобто без урахування моменту аеродинамічного опору при обертанні ротора турбіни в середовищі в'язкого газу. Основним параметром, необхідним для розрахунку потужності і ККД турбіни, є момент. Показано, що окружний (рушійний) момент струмінно-реактивної турбіни при розрахунках за допомогою програмного комплексу FlowVision може бути визначений декількома способами за результатами розрахованих параметрів, які виводяться в інформаційному вікні. Порівняння значень рушійного моменту, отриманого різними способами, в тому числі і за одновимірною теорією, показало, що вони відрізняються незначно: в межах до 12 %. Наведено залежності зміни цього моменту від частоти обертання ротора. Отримано значення окружної потужності та окружного ККД від частоти обертання ротора і проведено їх порівняння з результатами розрахунку цих залежностей за одновимірною теорією при розрахунковому і нерозрахунковому режимах витікання з тягового сопла. Найбільші значення окружної потужності і окружного ККД досягаються в діапазоні значень частоти обертання 24000-26000 об/хв; максимальні значення ККД знаходяться в діапазоні 45-48 %. Показано, що запропонована методика є найбільш достовірною з точки зору адекватності процесів,

що відбуваються всередині машини, і найменш витратною за часом з точки зору виходу розрахунку на стаціонарний режим. Верифікація отриманих результатів виконана за залежністю моменту на пусковому режимі від тиску на вході в струминно-реактивну турбіну шляхом порівняння результатів розрахунків у програмному комплексі FlowVision з експериментальними даними та з результатами розрахунку за одновимірною теорією.

Ключові слова: струминно-реактивна турбіна; проточна частина; моделювання; програмний комплекс; момент; потужність; коефіцієнт корисної дії.

MODELING THE ENERGY CHARACTERISTICS OF A JET-REACTIVE TURBINE

S. M. Vanyuev, M. I. Radchenko, S. S. Meleychuk, V. M. Baga, T. S. Rodymchenko

The aim of the work is to develop a methodology for studying the gas flow in the flowing part of a jet-reactive turbine stage, consisting of a supply nozzle and an impeller, using the FlowVision software package, as well as calculating the parameters and characteristics of this stage. In the process of modeling and research, a large number of types of boundary conditions, initial grids and adaptation levels, time calculation steps, etc. were used and verified. The results of calculations of the energy characteristics of a jet-reactive turbine when setting the pressure and temperature of the braked flow at the inlet to the stage 701325 Pa (overpressure - 600000 Pa) and 288 K, respectively, and the static pressure at the exit from the stage 1010325 Pa are presented. The characteristics of the turbine on the circumference of the impeller, that is, without taking into account the moment of aerodynamic drag during rotation of the turbine rotor in a viscous gas environment are received. The main parameter necessary for calculating the power and efficiency of the turbine is the moment. It is shown that the circumferential (driving) moment of a jet-reactive turbine during calculations using the FlowVision software package can be determined in several ways, based on the results of the calculated parameters displayed in the information window. Comparison of the values of the driving moment obtained in different ways, including the one-dimensional theory, showed that they differ slightly: up to 12%. The dependences of the change in this moment on the rotor speed are given. The values efficiency of the circumferential power and circumferential efficiency on the rotor speed are obtained, and they are compared with the results of calculating these dependences according to the one-dimensional theory for the calculated and non-calculated regime of flow from the driving nozzle. The highest values of the peripheral power and peripheral efficiency are achieved in the range of rotation speed values of 24000-26000 rpm; maximum values of efficiency are in the range of 45-48%. It is shown that the proposed technique is the most reliable from the point of view of the adequacy of the processes inside the machine and the time-spending from the point of view of calculating the stationary mode. Verification of the obtained results was carried out according to the dependence of the starting moment on the pressure at the inlet of the jet-reactive turbine through comparing the calculation results by using the FlowVision software package with experimental data and the calculation results according to the one-dimensional theory.

Keywords: jet-reactive turbine; flow part; modeling; software package; torque; power; efficiency.

Ванєєв Сергій Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедри технічної теплофізики, завідувач кафедри технічної теплофізики, Сумський державний університет, Суми, Україна.

Радченко Микола Іванович – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри кондиціонування і рефрижерації Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Мелейчук Станіслав Станіславович – канд. техн. наук, доцент кафедри технічної теплофізики, Сумський державний університет, Суми, Україна.

Бага Вадим Миколайович – канд. техн. наук, ст. викл. кафедри технічної теплофізики, Сумський державний університет, Суми, Україна.

Родимченко Тетяна Сергіївна – аспірант, кафедра технічної теплофізики, Сумський державний університет, Суми, Україна.

Vanieiev Serhiy Mykhaylovych – Candidate of Technical Science, Associated Professor, a Head Technical Thermophysics Department, Sumy State University, Sumy, Ukraine, e-mail: s.vaneev@kttf.sumdu.edu.ua.

Radchenko Mykola Ivanovych – Doctor of Technical Science, Professor, a Head Conditioning and Refrigeration Dept., Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com.

Meleychuk Stanislav Stanislavovych – Candidate of Technical Science, Associated Professor, Technical Thermophysics Department, Sumy State University, Sumy, Ukraine, e-mail: s.meleychuk@kttf.sumdu.edu.ua.

Baga Vadim Mykolayovych – Candidate of Technical Science, Senior Lecturer, Technical Thermophysics Department, Sumy State University, Sumy, Ukraine, e-mail: v.baga@kttf.sumdu.edu.ua.

Rodymchenko Tetiana Serhiivna - PhD Student, Technical Thermophysics Department, Sumy State University, Sumy, Ukraine, e-mail: t.rodymchenko@kttf.sumdu.edu.ua.