

УДК 621.438.2

**С. М. ВАНЕЕВ**, канд. техн. наук, доц.; доц. СумГУ, Сумы;

**В. В. ГЕТАЛО**, аспірант СумГУ, Сумы;

**С. К. КОРОЛЕВ**, с.н.с. ПАО «Сумское НПО им. М.В.Фрунзе», Сумы

## ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА FLOWVISION НРС ПРИ РАСЧЕТЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУЙНО-РЕАКТИВНОЙ ТУРБИНЫ

Утилизация энергии сжатых газов является перспективным и важным направлением при решении проблемы энергосбережения в современном мире. Турбогенераторные установки на базе струйно-реактивной турбины могут использоваться для утилизации энергии сжатых газов, например, на газораспределительных станциях. Данная статья посвящена расчету течения газа и построению характеристик струйно-реактивной турбины с помощью программного комплекса *FlowVision*, а также сравнению полученных результатов с результатами обработанных экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** струйно-реактивная турбина, численное моделирование, крутящий момент, мощность, КПД.

### Введение

Согласно многочисленным исследованиям в ближайшие десятилетия будет наблюдаться резкое возрастание роли природного газа в энергетике многих стран. Несмотря на активную политику энергосбережения, реализуемую в мире, особенно в развитых странах, рост потребления энергоресурсов продолжается, поскольку научно-технический прогресс неизбежен.

Одним из важных направлений энергосбережения в газовой промышленности является снижение потребления топлива и энергии за счет внедрения последних достижений науки и техники на существующих и проектируемых объектах энергетике, промышленности, транспорта и их инфраструктуры. В частности, снижение давления газа обычно производится в дросселирующих устройствах различных типов, в которых энергия избыточного давления газа безвозвратно теряется. Учитывая потребляемое количество природного газа в нашей стране, при подобном дросселировании потери энергии могут составить многие десятки миллиардов киловатт-часов в год.

Во многих странах в настоящее время уделяется значительное внимание полезному использованию энергии избыточного давления природного газа, разработке и внедрению соответствующих установок. Такими установками на практике в подавляющем большинстве являются турбодетандеры.

Главная проблема при внедрении турбодетандеров заключается в турбине, которая должна быть проста по конструкции с возможностью освоения обычным производством, надежна в эксплуатации, не требует сложных вспомогательных систем, включая систему подготовки газа перед турбиной, т.е. быть устойчивой к эрозионному износу, загибанию и обледенению. Ведь высокая стоимость турбодетандерных агрегатов ТДА на основе классических лопаточных турбин и сравнительная сложность их эксплуатации и ремонта, связаны именно с турбиной. Сложная и дорогая турбина требует соответствующих сложных вспомогательных систем, обеспечивающих её надежную работу и требуемый ресурс: принудительная система смазки опор ротора и передаточных муфт; система концевых уплотнений вала ротора; система автоматического управления и регулирования, система контроля и аварийных защит и, желательно, технического диагностирования; система подготовки

---

© С.М. Ванеев, В.В. Гетало, С.К. Королев, 2014

газа перед турбиной (очистки, осушки, подогрева), т.к. лопаточные аппараты и уплотнения турбины подвержены загрязнению, эрозионному износу, за гидрированию и обледенению.

С учетом изложенных аспектов предложено, в качестве альтернативы лопаточным турбинам, использовать для малых ТДА безлопаточную струйно-реактивную турбину (СРТ) в диапазоне мощностей от 50 до 700 кВт. СРТ предельно проста по конструкции и может быть освоена любым производством, в том числе малыми предприятиями.

Конструктивно СРТ очень проста (рис. 1). 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 (ТС). Полости вала и сопловых трубок соединены и образуют непрерывный газовый тракт от торцевого входа в осевой канал вала до ТС. Подвод газа в рабочее колесо осуществляется через осевой зазор с эффектом запирания сверхзвуковой струей, т.е. без использования уплотнения.

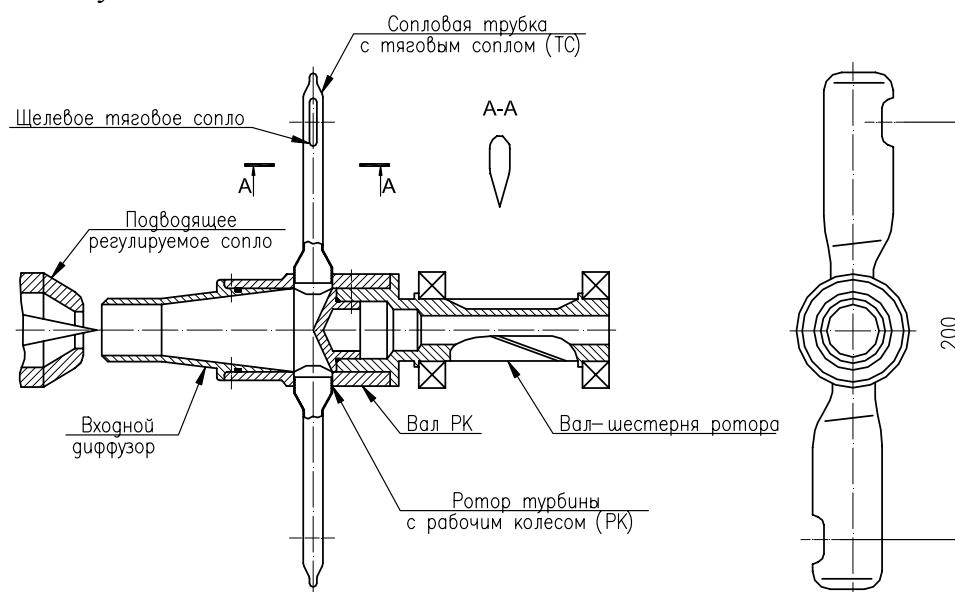


Рис. 1 – Конструктивная схема СРТ

### Анализ основных достижений и литературы

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

В последних публикациях [5] исследована проблема волнового кризиса на консолях ротора турбины и предложены рекомендации по исключению работы СРТ в зоне волнового кризиса. Данные исследования проводились с помощью только физического эксперимента. В работах [6, 7] выполнено моделирование и расчет течения газа в проточной части СРТ на пусковом режиме работы с помощью программного комплекса *FlowVision*. В статье [8] исследовано течение газа в проточной части СРТ (без учета сопротивления вращению ротора в среде вязкого газа) с построением зависимости крутящего момента турбины от частоты вращения ротора и

проведено сравнение полученных результатов с результатами расчета по одномерной теории.

В настоящее время остается открытым вопрос моделирования вращения ротора в среде вязкого газа с построением характеристик турбины.

#### Цель исследования и постановка задачи

Целью данной работы является отладка методики расчета и исследование течения газа в СРТ с помощью программно-вычислительного комплекса *FlowVision* НРС (*FV*), а также сравнение с результатами обработанных экспериментальных данных. Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать трехмерные модели проточной части корпуса и ротора СРТ;
- выполнить расчет течения газа с помощью программного комплекса *FlowVision* НРС;
- на основании полученных результатов провести сравнительный анализ с результатами физического эксперимента и сделать необходимые выводы.

#### Материалы исследования

Натурные трехмерные модели созданы в среде *SolidWorks*. Модели состоят из ротора турбины и проточной части корпуса по отдельности, для использования модуля подвижного тела *FV*. Модуль подвижного тела обеспечивает достаточно просто постановку задачи в *FV* практически без допущений, т.е. с учётом аэродинамического сопротивления консолей рабочего колеса, вращающихся в корпусе. При этом во *FV* посредством *stl*-файлов сначала загружался корпус, в который затем вставлялся ротор, как импортированный объект, на котором создавался модификатор «подвижное тело».

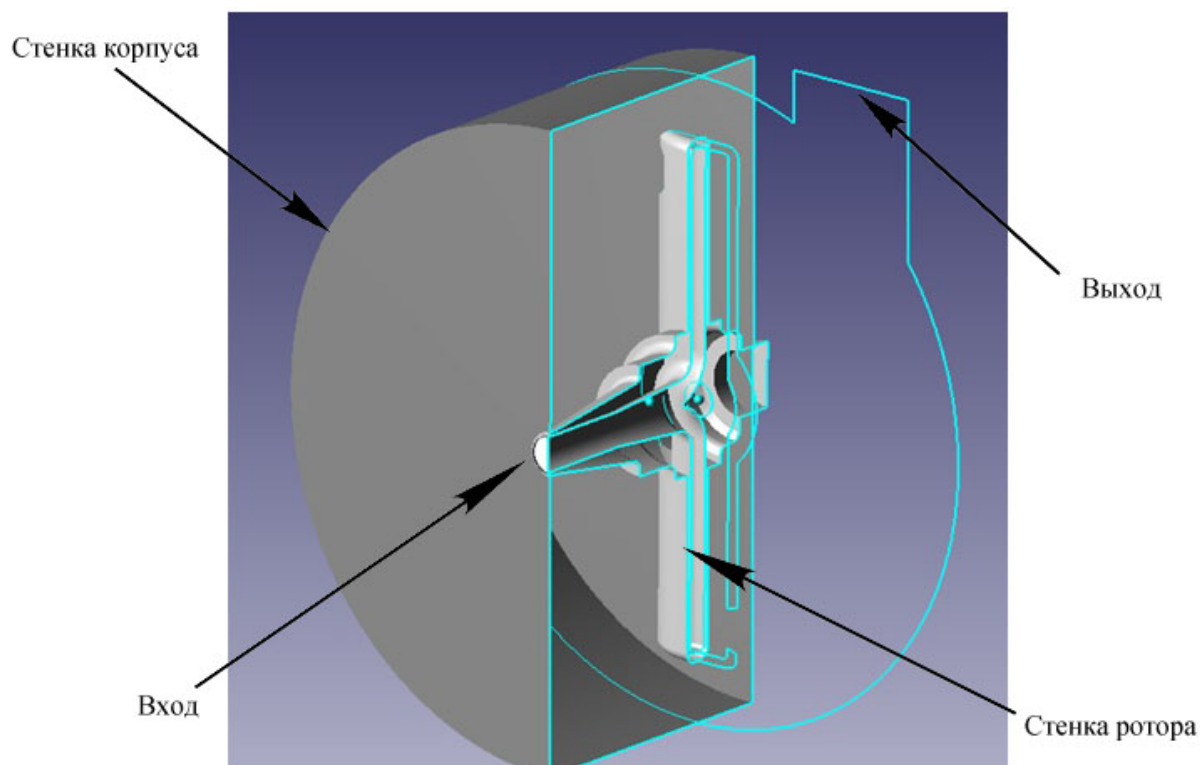


Рис. 2 – Трехмерная модель СРТ для расчета течения

С целью верификации результатов расчётов в  $FV$  с имеющимися экспериментальными данными испытаний СРТ на воздушном стенде, задача в  $FV$  ставилась идентично эксперименту, т.е. по параметрам задавались такие же условия.

Постановка задачи (по папкам препроцессора):

1) «Общие установки». Опорные величины: давление 101325 Па; температура 273,15 К.

2) «Вещества». Вещество: воздух из базы; фаза – газовая (равновесная); плотность – закон идеального газа.

3) «Физические процессы».

Движение = Ньютоновская жидкость

Теплоперенос = Конвекция и теплопроводность

Турбулентность =  $SST$ -модель.

4) «Объекты». Загружен «Импортированный объект» – Ротор (модификатор – «Подвижное тело»). Скорость вращения задавалась последовательно в 1/с в соответствие с оборотами: 0; 10000; 22357; 16000 об/мин.

5) «Граничные условия» (рис. 2).

Вход – тип «Вход/Выход»: полное давление 278846,4 Па; полная температура 25 °С.

Выход – тип «Свободный выход», давление 0 Па.

Стенка корпуса – тип «Стенка», логарифмический закон.

Стенка ротора - тип «Стенка», логарифмический закон.

6) «Начальная сетка». Задана начальная сетка  $20 \times 40 \times 35$  сравнительно не большой размерности для разгона расчёта. Далее проводились последовательные локальные адаптации сетки. Сечение адаптированной расчётной сетки показано на рис. 3.

Для солвера задавались постоянные шаги интегрирования по времени в диапазоне от  $7,5e-6$  до  $1e-5$ . Задача решалась в нестационарной постановке.

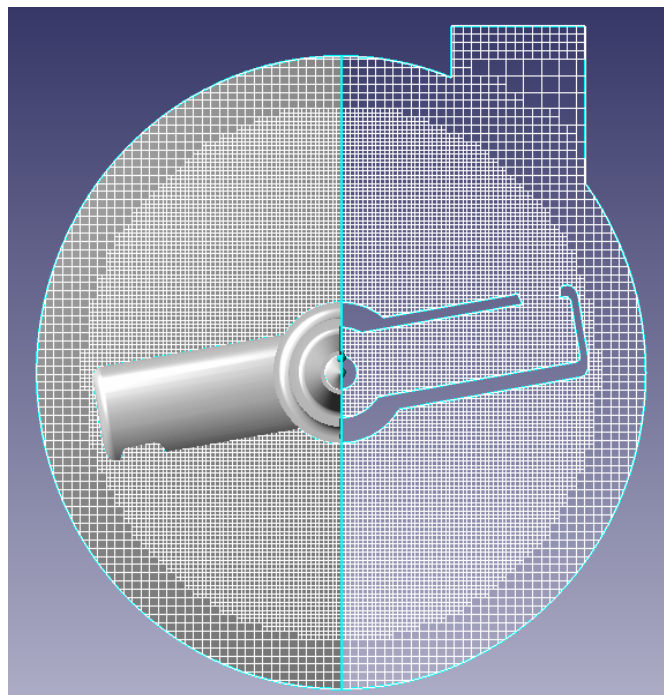


Рис. 3 – Расчетная сетка

Процесс расчета потока газа контролировался графиками сходимости по различным параметрам (т.е. выход расчета на стационарный режим). Пример такого графика для крутящего момента турбины приведен на рис. 4.

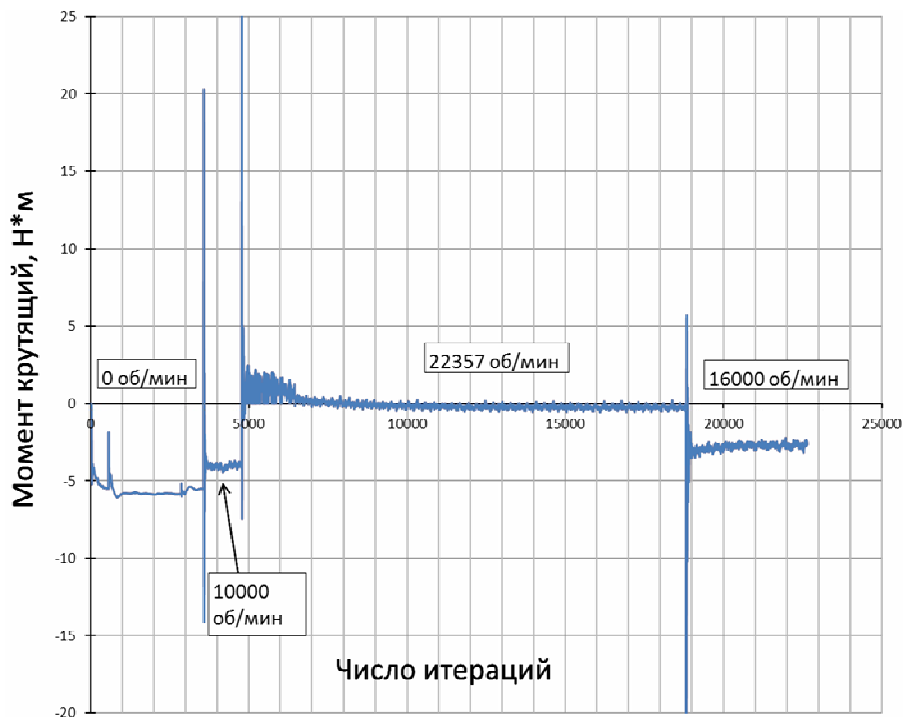


Рис. 4 – График изменения крутящего момента

После завершения расчета можно визуально оценить процесс течения газа, т.е. изменение контролируемых параметров вдоль проточной части турбины и внутри корпуса. Пример визуализации по векторам скорости при частоте вращения ротора СРТ  $n = 22357$  об/мин, представлен на рис. 5.

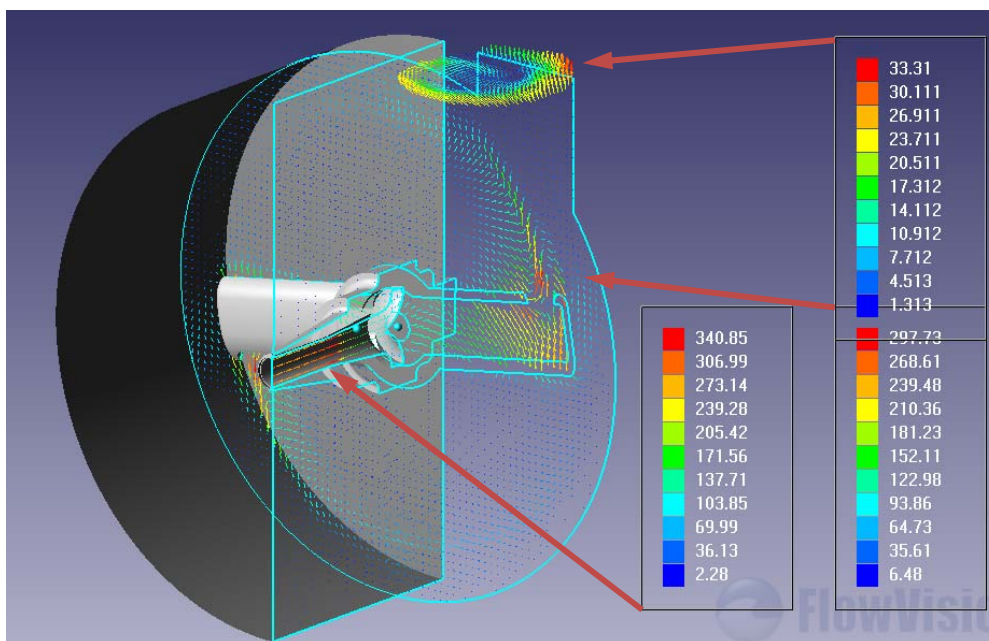


Рис. 5 – Визуализация расчета с помощью векторов скорости

**Результаты исследования**

По имеющимся экспериментальным данным проведен анализ полученных результатов расчетов и построены графические зависимости крутящего момента, мощности и КПД от числа оборотов. Необходимо акцентировать внимание на том, что общие точки сравнения характеристик находятся при 0 об/мин, 10000 об/мин, 16000 об/мин и 22357 об/мин.

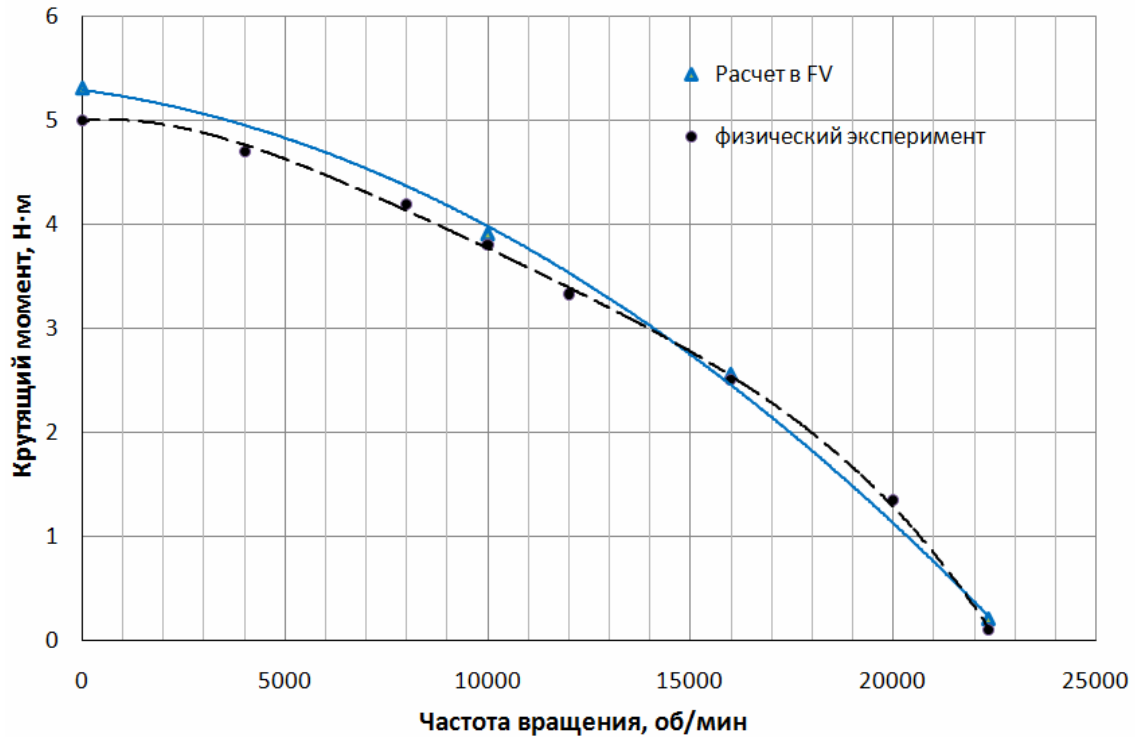


Рис. 6 – График изменения крутящего момента от частоты вращения

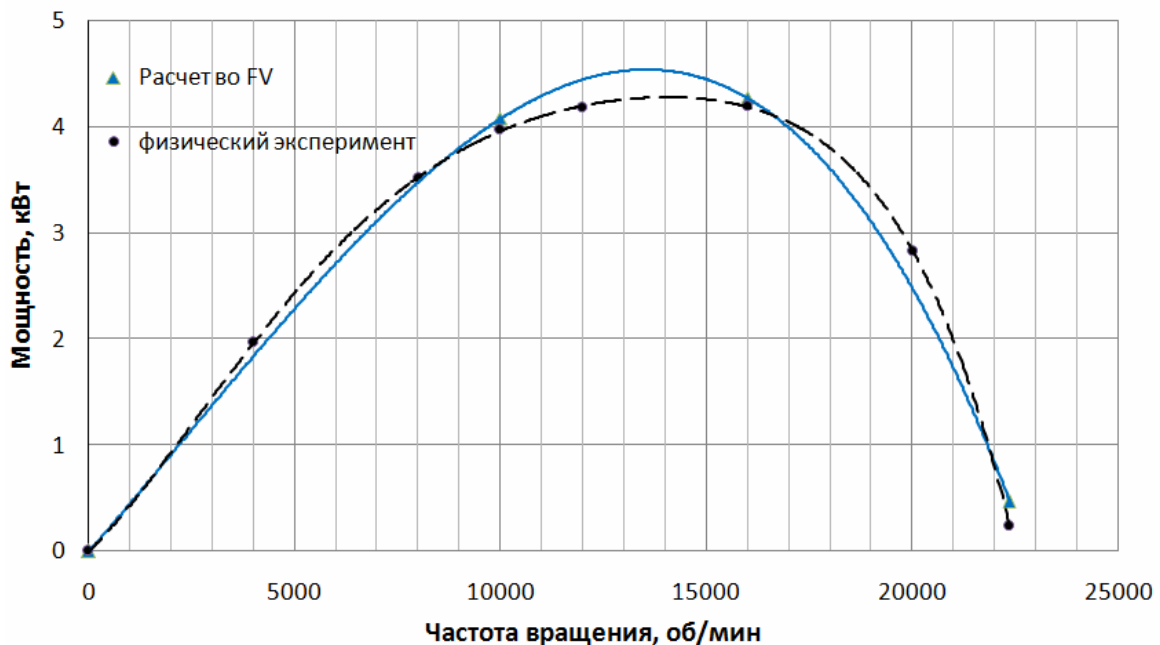


Рис. 7 – График изменения мощности от частоты вращения

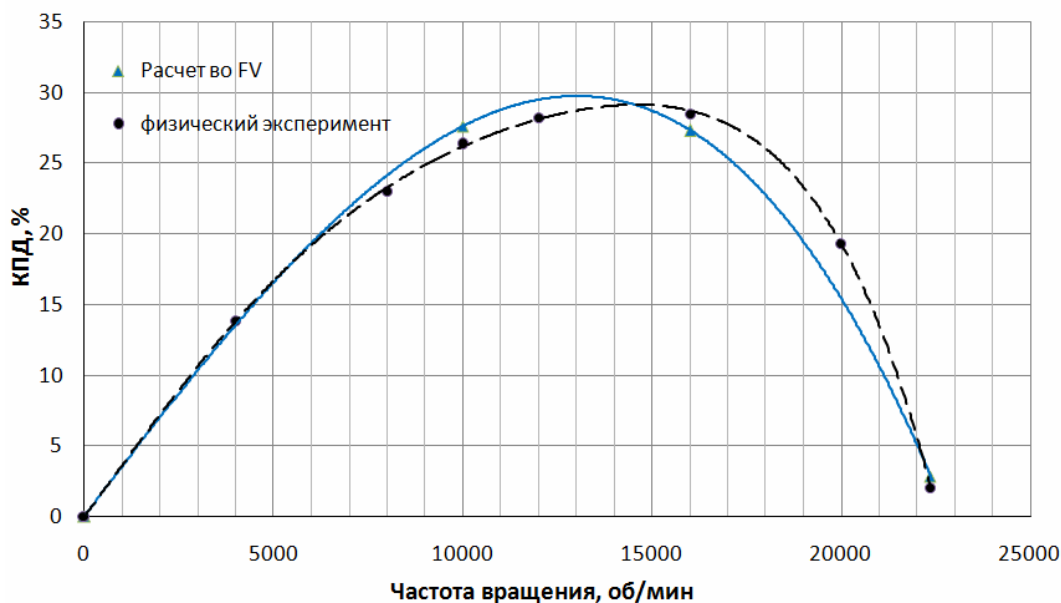


Рис. 8 – График изменения КПД турбины от частоты вращения

### Выводы

По результатам проведенных расчетов отметим следующее:

1) Выполнено моделирование и расчет течения газа в СРТ с помощью программного комплекса *FlowVision* НРС. Установлено, что приемлемая точность результатов обеспечивается при вышеупомянутых адаптациях граничных условий и фиксированного шага по времени расчета.

2) Результаты расчета характеристик турбины в программном комплексе подтверждены результатами экспериментальных исследований (относительная погрешность не превышает 7 % при принятых частотах вращения). Таким образом, установлена целесообразность применения программного комплекса *FlowVision* для расчета подобного круга задач.

3) Вычислительный эксперимент может стать очень удобной и перспективной альтернативой физическому эксперименту, что позволит сократить время исследования и повысить экономический эффект, поскольку создание стенда натуральных испытаний с необходимой обвязкой и подводами значительно дороже и затратнее по времени.

4) Дальнейшие исследования будут направлены на отработку методики расчета СРТ в условиях работы газораспределительных станций. Сравнительный анализ с изложенными в статье [5] рабочими характеристиками турбины, позволит дать оценку применения программно-вычислительного комплекса *FlowVision*, как инструмента современного инженера.

**Список литературы:** 1. Саяпин, В. В. Оптимизация параметров пневмопривода со струйным двигателем [Текст] / 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 [Текст] / В. В. Саяпин, И. А. Марочкина // Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления. – М.: Машиностроение, 1987. – Вып. 13. – С. 96–102. 3. Чащин, В. А. Пневмопривод систем управления летательных аппаратов [Текст] / В. А. Чащин, О. Г. Камладзе, А. Б. Кондратьев и др. – М.: Машиностроение, 1987. – 248 с. 4. Струйно-реактивный двигатель и возможности его использования [Текст] / С. М. Ванеев [и др.] // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1990. – № 6. – С. 16–17. 5. Исследование струйно-реактивной турбины для турбодетандерного агрегата [Текст] / С. М. Ванеев, В. В. Гетало, С. К. Королев // Энергетичні та

теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПІ»: Зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 8. – С. 82–90. – ISSN 2078-774X. **6.** 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. **7.** Исследование нереверсивной струйно-реактивной турбины для турбодетандера с помощью программного комплекса FlowVision [Текст] / С. М. Ванеев [и др.] // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2012. – № 3(29). – С. 22–28. **8.** Исследование характеристики струйно-реактивной турбины с помощью программного комплекса FlowVision [Текст] / С. М. Ванеев, В. В. Гетало, С. К. Королев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 12(986). – С. 36–42. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2078-774X.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Sajapin, V. V. "Optimizacija parametrov pnevmoprivoda so strujnym dvigatelem." *Pnevmatika i gidravlika. Privody i sistemy upravlenija*. No. 10. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 58–63. Print. **2.** Sajapin, V. V., I. A. Marochkina. "Optimizacija parametrov strujnogo dvigatelja po kriteriju minimuma rashoda gaza." *Pnevmatika i gidravlika. Privody i sistemy upravlenija*. No. 13. Moscow: Mashinostroenie, 1987. 96–102. Print. **3.** Chashhin, V.A., et al. *Pnevmoprivod sistem upravlenija letatel'nyh apparatov*. Moscow: Mashinostroenie, 1987. Print. **4.** Vaneev, S. M., et al. "Strujno-reaktivnyj dvigatel' i vozmozhnosti ego ispol'zovanija." *Himicheskoe i nefljanoe mashinostroenie* 6 (1990): 16-17. Print. **5.** Vaneev, S. M., V. V. Getalo and S. K. Korolev. "Issledovanie strujno-reaktivnoj turbiny dlja turbodetandernogo agregata." *Energetychni ta teplotehnichni procesy j ustatkuvannja. Visnyk NTU «HPI»*. No. 8. Kharkiv: NTU «HPI», 2012. 82–90. ISSN 2078-774X. Print. **6.** Vaneev, S. M., et al. "Issledovanie strujno-reaktivnoj turbiny dlja turbodetanderov v sistemah reducirovaniya gaza." *Materialy VIII mezhdunarodnoj nauchno – tehnicheckoj konferencii posvjashhennoj 90-letiju Odesskoj gosudarstvennoj akademii holoda: Ustojchivoe razvitie i iskusstvennyj holod, 8-10 oktjabrja 2012 goda*. 386–390. Print. **7.** Vaneev, S. M., et al. "Issledovanie nereversivnoj strujno-reaktivnoj turbiny dlja turbodetandera s pomoshh'ju programmnoho kompleksa FlowVision." *Kompressornoe i jenergeticheskoe mashinostroenie* 3(29) (2012): 22–28. Print. **8.** Vaneev, S. M., V. V. Getalo and S. K. Korolev. "Issledovanie harakteristiki strujno-reaktivnoj turbiny s pomoshh'ju programmnoho kompleksa FlowVision." *Visnyk NTU «HPI». Serija: Energetychni ta teplotehnichni procesy j ustatkuvannja*. No. 12(986). Kharkiv: NTU «HPI», 2013. 36–42. ISSN 2078-774X. Print.

*Поступила (received) 22.02.2014*