

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕВЕРСИВНОЙ СТРУЙНО-РЕАКТИВНОЙ ТУРБИНЫ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА FLOWVISION

*С. М. Ванев\**, канд. техн. наук, доцент;

*А. С. Бережной\**, аспирант;

*Е. Ю. Ховяков\**, магистр;

*В. В. Гетало\**, аспирант;

*Н. Н. Фроленко\**, магистр;

*С. К. Королев\*\**, ст. науч. сотрудник,

*\*Сумский государственный университет, г. Сумы;*

*\*\* ПАО «Сумское НПО им. М.В.Фрунзе»*

*В работе представлен пневматический привод шаровых кранов на базе струйно-реактивной турбины как альтернатива существующим и широко распространённым в данное время пневмогидроприводам. Определены его преимущества и недостатки, а также проведено исследование течения в газовом тракте опытного образца такого привода с помощью программного комплекса FlowVision. Точность расчетов оценивалась сопоставлением полученных пусковых моментов с экспериментальными данными.*

**Ключевые слова:** *пневмопривод, струйно-реактивная турбина, пусковой момент, численное моделирование, FlowVision.*

### ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие газотранспортных систем обуславливает новые повышенные требования к выходным характеристикам и эксплуатационным показателям оборудования компрессорных станций и линейной части магистральных газопроводов.

Важной народнохозяйственной задачей является создание эффективного, надежного и удобного в эксплуатации пневматического (газового) привода шаровых кранов больших проходных сечений ( $DN > 300$  мм), которые устанавливаются на компрессорных станциях и на линейной части магистральных газопроводов.

Основным типом автоматического привода, применяемого в настоящее время для запорной и регулирующей арматуры как у нас, так и за рубежом, является пневмогидропривод, в котором в качестве рабочего тела используется непосредственно природный газ. Приводы этого типа имеют ряд недостатков. Наличие гидробаллонов с маслом приводит к увеличению массогабаритных характеристик и эксплуатационных расходов, связанных с необходимостью создания запасов масла на компрессорных станциях, контроля его уровня в баллонах, периодической регулировки привода при изменении температуры окружающей среды, а также к возникновению аварийных ситуаций при утечке масла. Пневмоприводы по схеме «газ-масло» позволяют несколько улучшить массогабаритные характеристики приводов и снизить расход масла, но вышеперечисленных проблем в полной мере не решают [1].

Во «ВНИИКомпрессормаш» был создан опытный образец струйно-реактивного турбопривода (СРТП), основными частями которого являются струйно-реактивный двигатель (СРД) и винтокулисный передаточный механизм. СРТП, в свою очередь, состоит из струйно-реактивной турбины (СРТ) и зубчатого редуктора, испытания которых были проведены на модельном стенде и в составе шарового крана (рис. 1) [2].

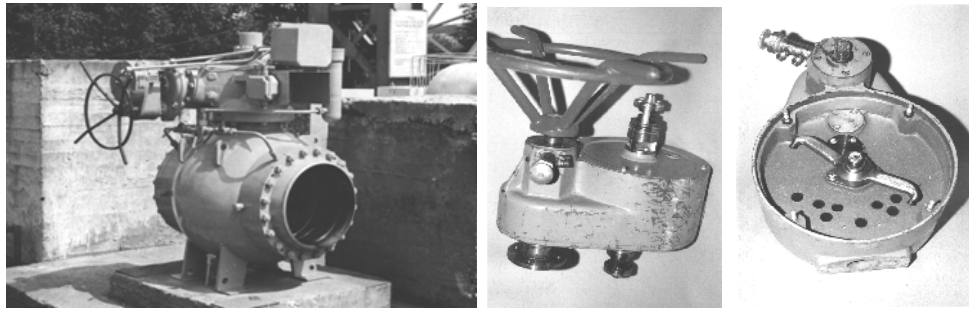


Рисунок 1 – Кран шаровый DN 500 PN 80 со струйно-реактивным турбоприводом

Пневматический (газовый) СРТП имеет ряд преимуществ перед другими типами пневматических приводов: простота конструкции, высокая надежность, лучшие массогабаритные показатели, отсутствие масла как рабочего тела.

На рисунке 2 представлена конструктивная схема реверсивной струйно-реактивной турбины.

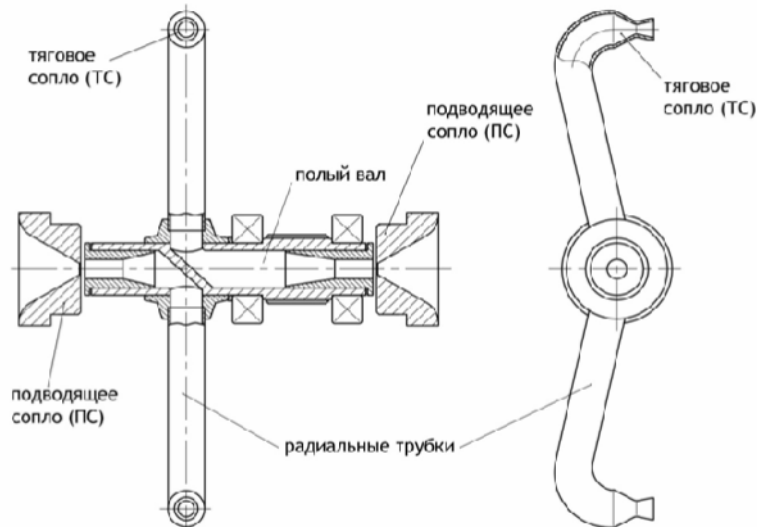


Рисунок 2 – Конструктивная схема реверсивной струйно-реактивной турбины

Основными элементами СРТ являются: подводящее устройство и ротор, состоящий из полого вала с радиальными трубками, закрепленными на боковой поверхности вала, на концах которых имеются тяговые сопла (ТС). Для обеспечения реверса турбины в валу выполняется перегородка. Газ через питательное сопло подводится в полый вал ротора и далее по газовому тракту к тяговому соплу. В тяговом сопле потенциальная энергия сжатого газа преобразуется в кинетическую энергию струи, которая, вытекая со сверхзвуковой скоростью из тягового сопла, создает реактивную силу и соответственно крутящий момент на валу турбины. При этом чем выше давление перед тяговым соплом, тем выше эффективность турбины. Поэтому основной задачей при повышении эффективности СРТ является минимизация потерь энергии в проточной части турбины от входа в питательное сопло до входа в тяговое сопло.

Конструкция струйно-реактивной турбины, которая исследовалась в данной работе, имеет еще одно преимущество – в конструкции применен оригинальный тип бесконтактных уплотнений, основанных на газодинамическом запирании торцевого зазора при осевом подводе сверхзвукового струи газа в канал ротора. А наличие гарантированного торцевого зазора между подводящим соплом и вращающимся ротором исключает возможность задигов и заклинивания этих деталей, а также их взаимного примерзания при работе на влажном газе, что также обуславливает высокую надежность и эффективность работы.

### ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Целью данной работы являлось исследование течения газа в проточной части струйно-реактивной турбины с помощью программного комплекса FlowVision.

Основные задачи работы: исследование влияния основных геометрических размеров тягового и питательного сопел, избыточных давлений на входе СРТ на результаты расчетов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В системе автоматического проектирования были созданы расчетные модели проточной части СРТ с разными размерами питающих и тяговых сопел (рис. 3, 4) и произведены их расчеты в программном комплексе FlowVision на ряд давлений. Конкретнее был выполнен расчет четырех вариантов СРТ в зависимости от критических диаметров и диаметров среза питающего и тягового сопел. Исполнение СРТ1 имеет следующие параметры:  $d_{кр.п} * d_{ср.п} = 3\text{мм} * 3,8\text{мм}$ ;  $d_{кр.т} * d_{ср.т} = 4,5\text{мм} * 7\text{мм}$ . Остальные исполнения выполнены на следующие геометрические параметры:

СРТ2:  $d_{кр.п} * d_{ср.п} = 3\text{мм} * 3,8\text{мм}$ ;  $d_{кр.т} * d_{ср.т} = 5\text{мм} * 7,5\text{мм}$ ;  
 СРТ3:  $d_{кр.п} * d_{ср.п} = 4\text{мм} * 4,8\text{мм}$ ;  $d_{кр.т} * d_{ср.т} = 4,5\text{мм} * 7\text{мм}$ ;  
 СРТ4:  $d_{кр.п} * d_{ср.п} = 4\text{мм} * 4,8\text{мм}$ ;  $d_{кр.т} * d_{ср.т} = 5\text{мм} * 7,5\text{мм}$ .

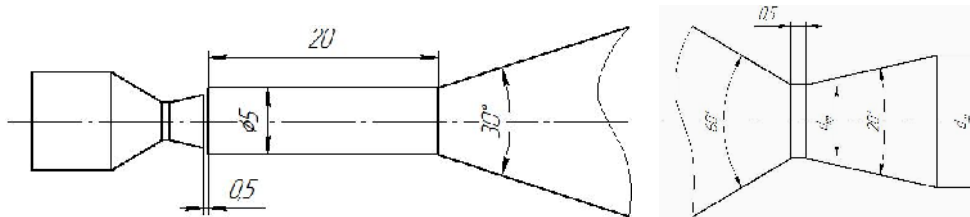


Рисунок 3– Эскиз исследуемой проточной части СРТ (слева – подвод, справа – тяговое сопло)



Рабочей средой для расчета проточной части СРТ был выбран природный газ. Модель рассчитывалась на сетке 25x18x16 [3]. Для получения более точных результатов расчета была введена адаптация расчетной сетки входа и выхода питающего сопла, зазора между соплом и втулкой диффузора СРТ входа в ротор и тягового сопла СРТ (рис. 5).

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Рисунок 4 – Твёрдотельная модель проточной части СРТ

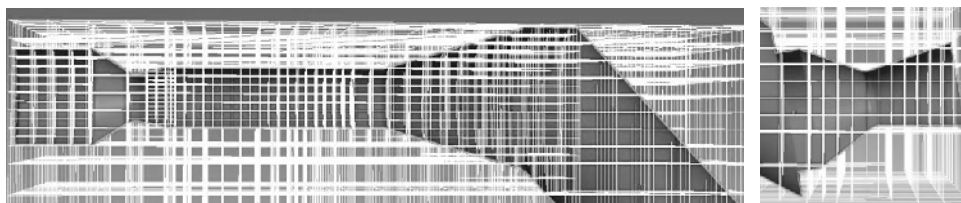


Рисунок 5 – Адаптация граничных условий  
(слева – вход, справа – тяговое сопло)

В таблице 1 используются следующие величины: P1-избыточное давление на входе в питающее сопло; C1-скорость газа на входе в ПС; T1-температура газа на входе в ПС; m1 – массовый расход газа на входе ПС; P2-избыточное давление на выходе из ТС; C2-скорость газа на выходе из ТС; T2-температура газа на выходе из ТС; m2 – массовый расход газа на выходе ТС.

Таблица 1 - Результаты расчета

Модель	Избыточное давление на входе в СРТ, МПа	Параметры на входе				Параметры на выходе				Пусковой момент, Н <sup>3</sup> ·м
		P1, МПа	C1, м/с	T1, К	m1, кг/с	P2, Па	C2, м/с	T2, К	m2, кг/с	
СРТ1	1,5	1,486	37,9	288	0,020	-28482	629,9	198	0,017	0,983
	2,5	2,495	37,9	288	0,033	-8619	705,0	176	0,027	1,937
	3,5	3,495	38,0	288	0,046	12556	739,3	164	0,038	2,888
	4,5	4,490	38,0	288	0,059	35126	761,4	158	0,049	3,880
СРТ2	1,5	1,486	38,3	288	0,020	-29589	617,3	201	0,018	1,032
	2,5	2,496	38,3	288	0,033	-9821	692,8	180	0,030	2,051
	3,5	3,495	38,2	288	0,046	11256	724,0	169	0,041	3,048
	4,5	4,493	38,2	288	0,059	33624	747,7	163	0,053	4,128
СРТ3	0,8	0,779	66,4	288	0,020	-31931	607,2	206	0,015	0,814
	1,5	1,488	66,2	288	0,035	-10531	704,0	176	0,027	1,870
	2,2	2,146	66,7	288	0,056	12999	741,8	164	0,038	2,923
	3	2,977	66,4	288	0,069	39832	762,5	157	0,051	4,084
СРТ4	0,8	0,779	66,6	288	0,020	-28683	584,7	212	0,017	0,877
	1,5	1,487	66,5	288	0,035	-8802	686,0	182	0,029	2,010
	2,2	2,148	66,8	288	0,056	14102	727,8	169	0,042	3,170
	3	2,971	66,8	288	0,069	41426	753,1	160	0,057	4,512

**Вывод.** Как видно из таблицы результатов – геометрические размеры влияют на результаты расчета. Чем выше давление на входе СРТ, тем выше числовое значение пускового момента. Так же видно, что 2-е и 4-е исполнение СРТ предпочтительнее по значению удельного пускового момента.

На рисунках 6, 7 представлена визуализация распределения параметров потока в проточной части СРТ в виде двумерных графиков.

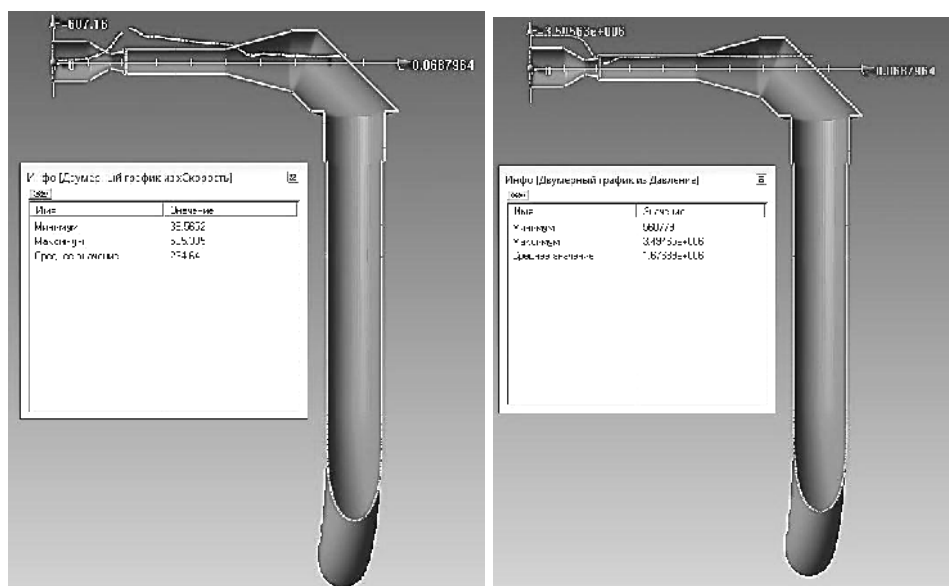


Рисунок 6 – Изменение скорости (слева) и давления (справа) в газовом тракте СРТ1 при  $P_1 = 4,5$  МПа

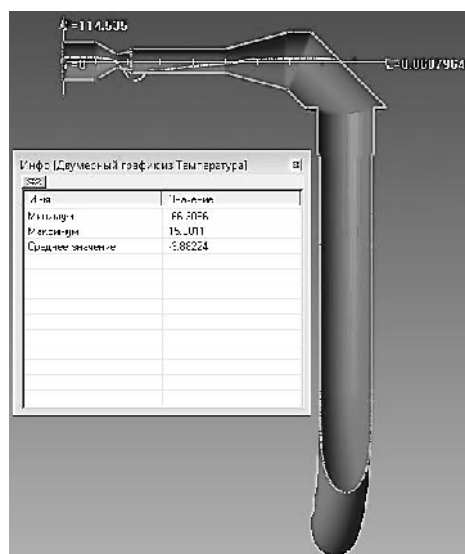


Рисунок 7 – Изменение температуры в газовом тракте СРТ1 при  $P_1 = 4,5$  МПа

Из рисунка 6 видим, что газ в питательном сопле разгоняется до сверхзвуковой скорости. При входе газа в канал ротора СРТ скорость газа падает до скорости, меньшей скорости звука, образуя скачок уплотнения. Расположение скачка уплотнения во втулке-диффузоре существенно зависит от геометрических размеров питающего и тягового сопел.

По завершению расчетов сравниваем полученные результаты с экспериментальными. На рис. 8–11 показаны зависимости пускового момента на валу СРТ от избыточного давления на входе СРТ.

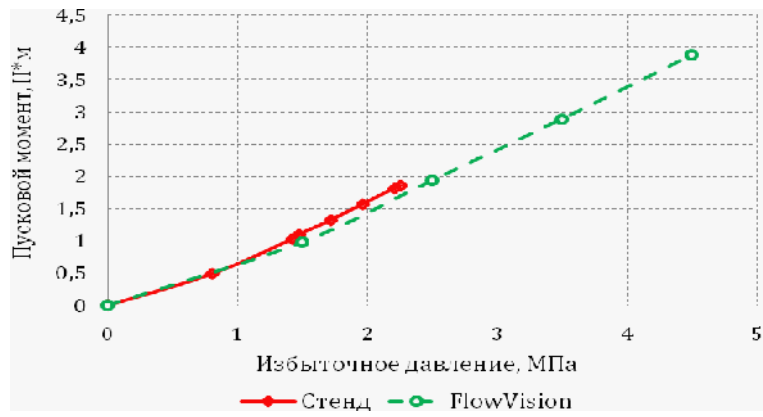


Рисунок 8 - Зависимость пускового момента от избыточного давления P1 для СРТ1

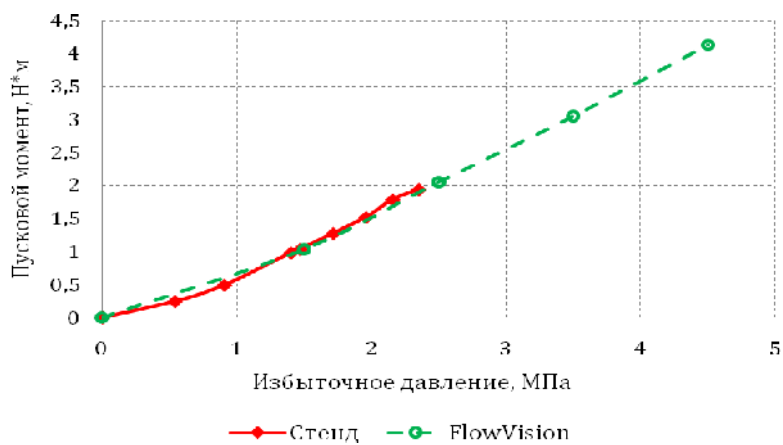


Рисунок 9 - Зависимость пускового момента от избыточного давления P1 для СРТ2

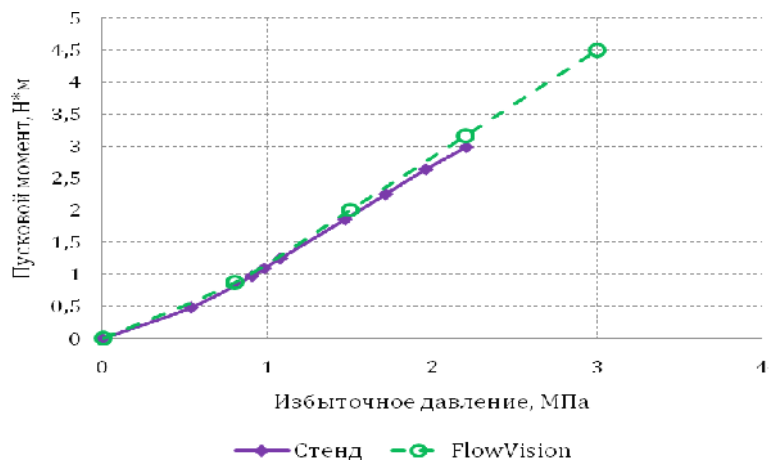


Рисунок 10 - Зависимость пускового момента от избыточного давления P1 для СРТ3

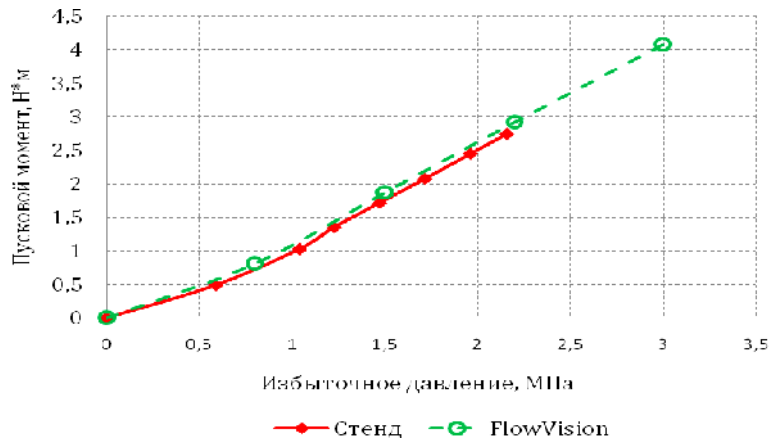


Рисунок 11 - Зависимость пускового момента от избыточного давления  $P_1$  для СРТ4

**Вывод.** Из графиков видно, что результаты расчетов во FlowVision близки к результатам, которые были получены на экспериментальном стенде.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате отработана методика расчета течения газа в проточной части СРТ на пусковом режиме.
2. Выполнен расчет параметров газа в проточной части СРТ с различными размерами подводящих и тяговых сопел в зависимости от избыточного давления на входе.
3. Расчет с помощью программного комплекса с удовлетворительной точностью совпал с результатами экспериментальных исследований (относительная погрешность составила не более 5%).
4. Из двумерных графиков, представленных на рисунках 6 и 7, видна неэффективная работа диффузора: весьма незначительное падение скорости при увеличении площади поперечного сечения. Это вызвано большим углом раскрытия диффузорного участка газового тракта и, как следствие, отрывным течением у стенок. Такой угол диффузора опытного образца обусловлен желанием конструкторов уменьшить осевой размер турбины, но, как видим, следствием этого является неэффективная и гидравлически несовершенная работа данного элемента.
5. В дальнейшем на основе полученных результатов можно рассчитывать характеристики СРТ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ванеев С. М. Анализ конструктивных схем приводов шаровых кранов DN=300-1400 мм для компрессорных станций магистральных газопроводов / С. М. Ванеев, С. К. Королев, В. П. Ена // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету. – 2000. – Вип. 7. – С. 52–57.
2. Исследование и экспериментальные работы по отработке и оптимизации пневматических приводов со струйно-реактивным двигателем для шаровых кранов: Отчет о НИР (ВНИИкомпрессормаш) : рук. темы С. К. Королев. – № ГР0870042515, инв. № 02870088015. – Сумы, 1987. – 180 с.
3. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. Руководство пользователя. – Москва: ООО «ТЕСИС».

*Поступила в редакцию 12 июня 2012 г.*