

---

---

## ПРИКЛАДНА ГІДРОАЕРОМЕХАНІКА І ТЕПЛОМАСООБМІН

---

---

УДК 621.165

### ВИХРЕВЫЕ И СТРУЙНО-РЕАКТИВНЫЕ РАСШИРИТЕЛЬНЫЕ ТУРБОМАШИНЫ

**Ванев С.М., канд. техн. наук, доцент**  
*Сумский государственный университет*

*В статье рассмотрены струйно-реактивные и вихревые турбины и возможности применения их в качестве пневмоприводов шаровых кранов магистральных газопроводов и турбогенераторов для утилизации потенциальной энергии сжатого газа или пара. Даны некоторые результаты экспериментальных исследований струйно-реактивных турбин.*

Для безопасной эксплуатации магистральных газопроводов актуальной является задача создания пневматического (газового), эффективного, надежного и удобного в эксплуатации привода.

В соответствии с требованиями "Газпрома" приводы шаровых кранов, устанавливаемых на компрессорных станциях и на линейной части магистральных газопроводов, должны использовать в качестве рабочего тела неподготовленный (непосредственно из трубы) природный газ и обеспечивать управление краном при давлении газа на входе в привод от 1,5 МПа до максимального (PN 6,4; 8,0; 10 и 16 МПа). При этом температура газа на входе в привод может изменяться в пределах от -30°С до +80°С, окружающего воздуха - от -60°С до +45°С.

Такие сложные требования практически полностью исключили возможность использования для кранов с диаметрами проходного сечения DN>300 мм чисто пневматических (газовых) приводов объемного принципа действия (поршневых, шестеренных, ротационно-пластинчатых и др.). Это обусловлено необходимостью значительного увеличения размеров силовой части привода для обеспечения работоспособности привода на низком давлении (1,5 МПа) и излишней мощностью привода при работе на высоких (номинальных) давлениях (5,5-7,5 МПа), что приводит к возникновению аварийных ситуаций и нестабильной работе привода (с рывками и ударами) в случае закусывания или примерзания подвижных частей привода или крана с последующим срывом. Кроме того, загрязненность и влажность газа усугубляют положение, приводят к более быстрому выходу из строя пар трения.

В настоящее время на магистральных газопроводах в качестве привода шаровых кранов больших проходных сечений (DN=200 - 1400 мм) используются в основном поршневые пневмогидравлические приводы. Основными их элементами являются пневмоцилиндр, гидроцилиндр, ручной насос и блок управления. В пневмогидроприводе излишняя энергия газа рассеивается посредством гидроторможения, что обеспечивает стабильную и безударную работу привода. Однако он имеет сложную и громоздкую конструкцию, малый коэффициент полезного действия, сложен в эксплуатации, т.к. требует постоянного наличия, контроля и дозаправки масла, а в случае утечки или отсутствия масла возникают ударная работа и аварийная ситуация [1].

В области энергосбережения актуальной является задача утилизации потенциальной энергии давления сжатых газов и паров, которая безвозвратно теряется на редукторах и регуляторах давления на газораспределительных станциях (ГРС) и газораспределительных пунктах в газовой промышленности, в различных технологических процессах, в химической и других отраслях промышленности, в коммунально-бытовом хозяйстве и т.п.

Только на ГРС потери этой энергии в 1988 году составляли  $10^9$  кВт·ч/год [2]. Это имело место на более чем 3500 ГРС (на территории СНГ). В Украине в 1994 году было 1100 ГРС [3] и можно предположить, что потери энергии составляли примерно  $1100 \cdot 10^9 / 3500 \approx 3 \cdot 10^8$  (кВт·ч)/год. Причем на большинстве из этих ГРС возможно получение полезной мощности не более 1 МВт [3,4].

Для решения этих задач (создание безопасных пневмоприводов арматуры и утилизация потенциальной энергии давления сжатых газов и паров) могут использоваться вихревые и струйно-реактивные турбины [4-12]. Для рассматриваемых областей применения эти турбины имеют ряд несомненных преимуществ перед классическими (осевыми и центробежными) турбинами [8, 9, 11, 12].

На рис. 1 показана конструктивная схема вихревой турбины. В вихревой турбине рабочее тело через сопло 1 поступает в проточную часть, образованную каналом 2 корпуса 3 и межлопаточными каналами 4 рабочего колеса 5, вращающегося в корпусе с малыми радиальными и торцевыми зазорами. Из проточной части газ отводится через выходное отверстие. Между соплом и выходным отверстием расположен отсекающий элемент 6.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований вихревых расширительных турбомашин изложены в работах [4, 7, 9, 12-19].

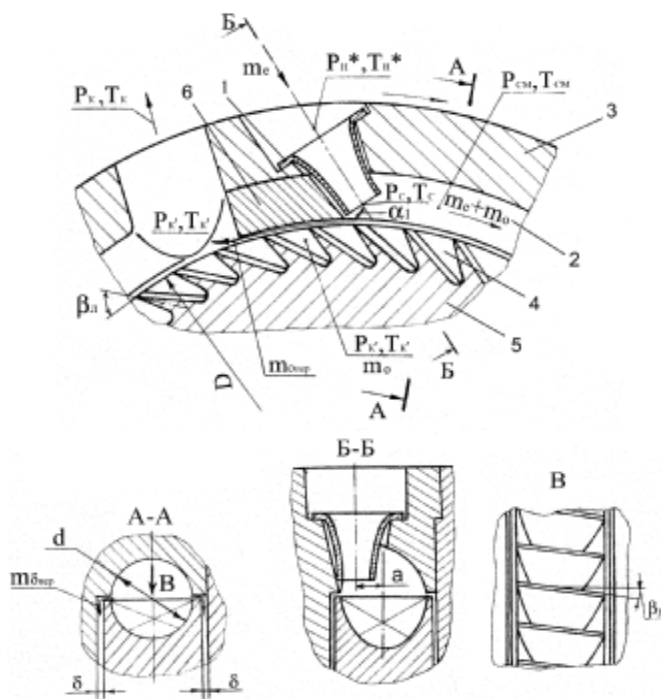


Рисунок 1 - Конструктивная схема вихревой ступени с периферийным каналом

На рис. 2 показана конструктивная схема струйно-реактивной турбины (СРТ).

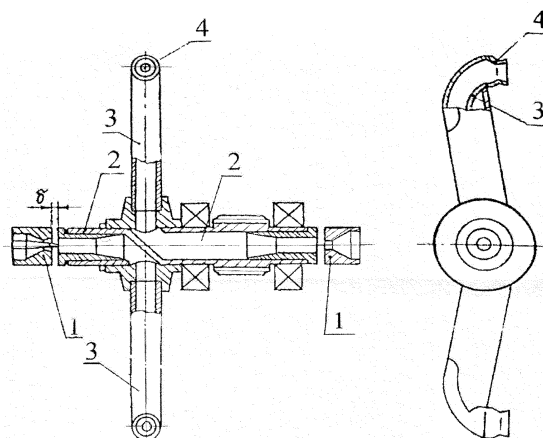


Рисунок 2 – Конструктивная схема реверсивной струйно-реактивной турбины

Основными элементами СРТ (рис. 2) являются: подводящее устройство (простое или регулируемое сопло) 1 и ротор, состоящий из полого вала 2 с радиальными трубками 3, закрепленными на боковой поверхности вала, на концах которых имеются тяговые сопла 4. 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, истекая 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.

В теоретической части работ по исследованию СРТ разработаны: математическая модель течения в проточной части СРТ на пусковом режиме [20]; структура потерь энергии и КПД [21], методика расчета характеристик СРТ [22], методика проектного расчета.

На рисунках 3-7 представлены некоторые результаты экспериментальных исследований струйно-реактивных турбин различного назначения, полученные в разное время и на разных стендах.

На рис. 3 представлены зависимости силы тяги СРТ на пусковом режиме от давления на входе СРТ и диаметра критического сечения подводящего ( $d_{кр.п}$ ) сопла при постоянном диаметре критического сечения тягового сопла ( $d_{кр.т}$ ). Зависимости получены для природного газа при исследованиях СРТ в реверсивном исполнении для привода шарового крана DN 500 PN 80 [23]. На рис. 4 представлены зависимости пускового момента от давления на входе СРТ, полученные для воздуха при исследованиях на модельном стенде СРТ в нереверсивном исполнении. На этом же рис. 4 показано сравнение зависимостей: идеальной, рассчитанной для изоэнтропного процесса расширения газа в проточной части СРТ (зависимость 1); расчетной с учетом потерь энергии и утечек (зависимость 2) и экспериментальной (зависимость 3). Из рисунков 3, 4 видно, что сила тяги изменяется практически прямопропорционально давлению питания. Из рис. 4 видно, что расчетная зависимость  $M_{пуск} = f(P_{вх})$  достаточно хорошо согласуется с экспериментальной.

На рис. 6 представлены зависимости мощности, затрачиваемой на аэродинамическое сопротивление, от частоты вращения ротора для ротора СРТ по рис. 3 при прокрутке его от электродвигателя и для гладкого диска. Как видно из графика, потери энергии на аэродинамическое сопротивление для ротора СРТ существенно больше, чем для гладкого диска.

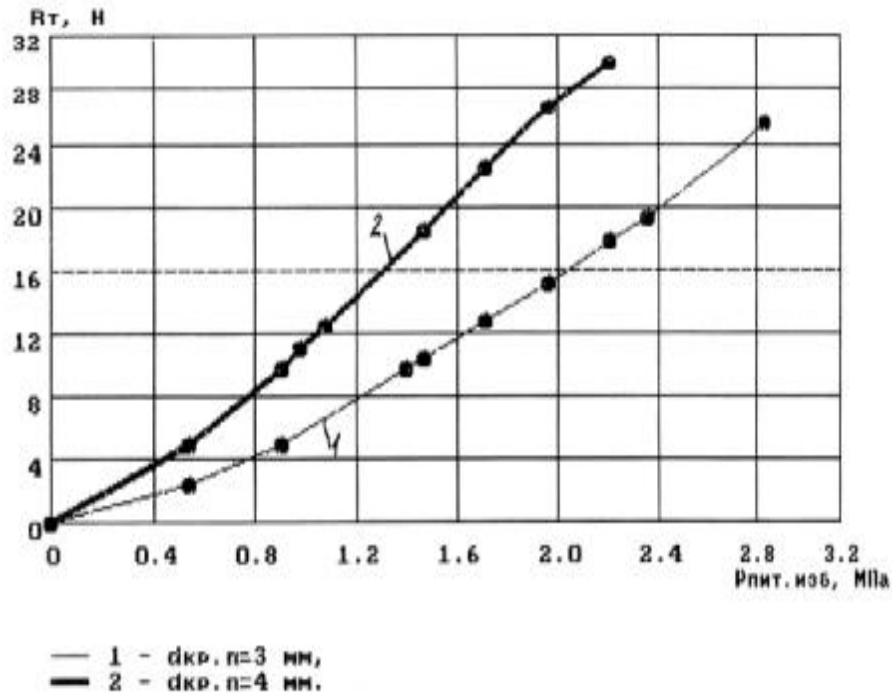


Рисунок 3 – Зависимости силы тяги тягового сопла на пусковом режиме от давления на входе СРТ ( $d_{кр.п} = 5$  мм)

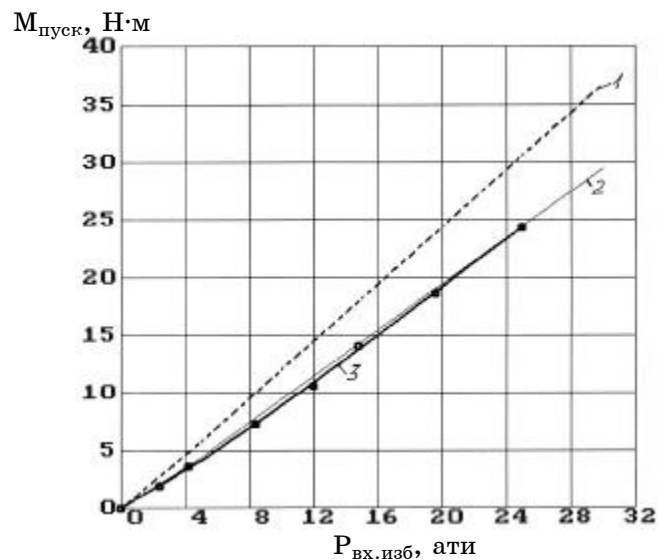


Рисунок 4 - Зависимости пускового момента от давления на входе СРТ ( $d_{кр.п} = 4,265$  мм,  $d_{кр.п} = 10,5$  мм)

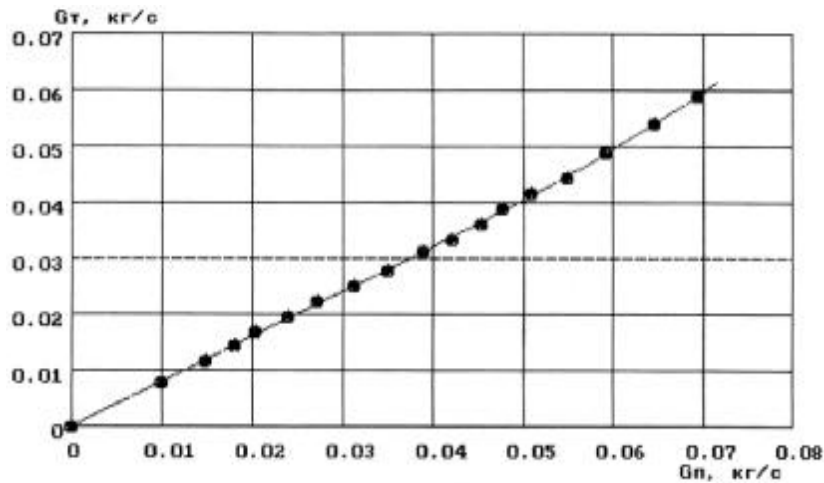


Рисунок 5 - Зависимости расхода воздуха через тяговое сопло от давления на входе СРТ ( $d_{кр.п}=5$  мм,  $d_{кр.т}=6,5$  мм)

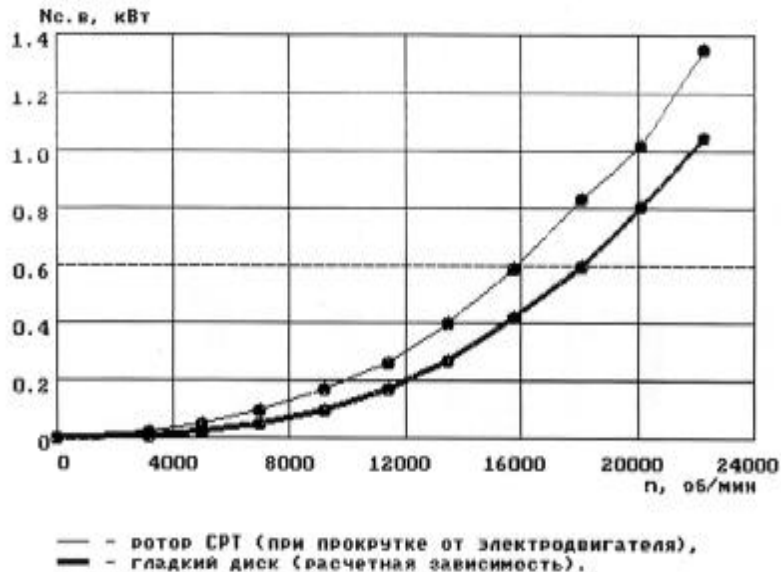


Рисунок 6 – Зависимости мощности аэродинамического сопротивления от частоты вращения ротора СРТ

На рис. 7 показаны характеристики СРТ при давлении на входе СРТ 25 ати и  $d_{кр.п}=4,265$  мм: идеальные характеристики, рассчитанные без учета потерь энергии в подводящем сопле ( $\mu_n=1,0$ ) и без учета утечек воздуха из проточной части турбины ( $\alpha_{ym}=0,0$ ) (см. зависимости 1); расчетные характеристики, рассчитанные при коэффициенте расхода подводящего сопла  $\mu_n=0,97$  и коэффициенте утечек  $\alpha_{ym}=0,1$  (см. зависимости 2); на этом же рисунке показаны экспериментальные точки, полученные при исследованиях пускового момента и частоты вращения ротора СРТ на холостом ходу (3). Из рисунка видно, что экспериментальные точки достаточно хорошо совпадают с расчетными значениями.

М, Н\*м; N, кВт, КПД

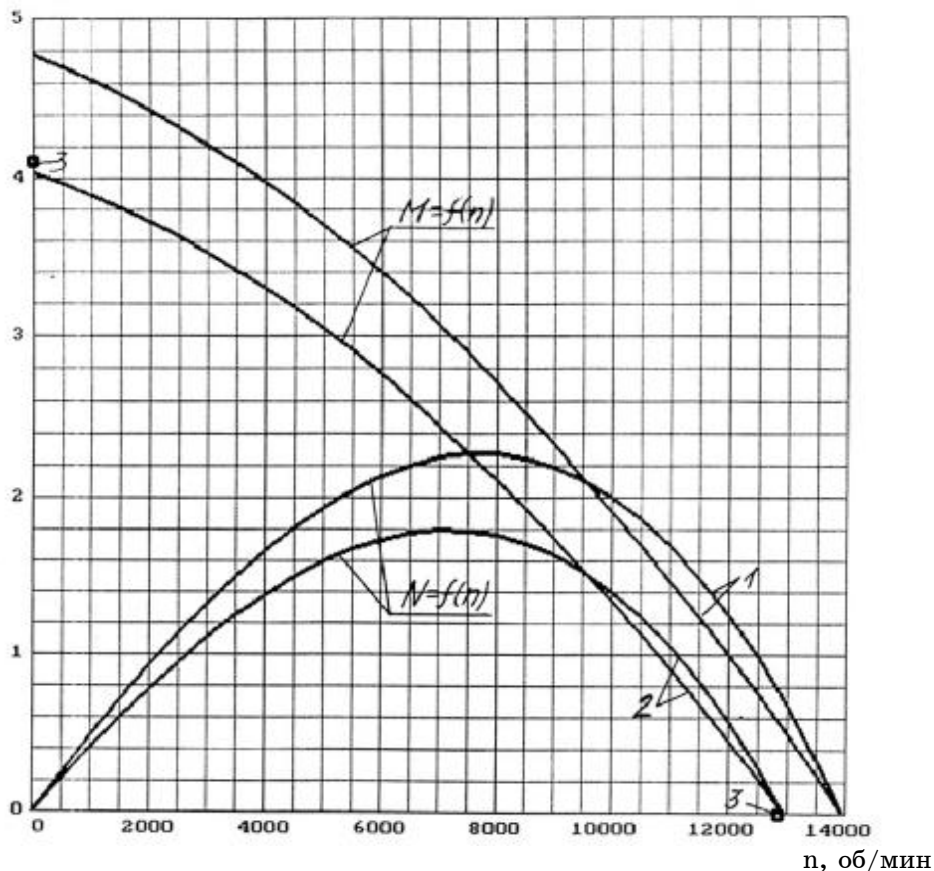


Рисунок 7 - Зависимости крутящего момента мощности СРТ от частоты вращения вала СРТ при  $P_{вх}=25$  атм и  $d_{кр.л}=4,265$  мм

В процессе исследований и отработки вихревых и струйно-реактивных турбин предложено и реализовано несколько оригинальных технических решений [24,25,26].

В 1988 году турбопривод с СРТ и винтокулисным передаточным механизмом в составе шарового крана DN 500 мм, PN 8 МПа успешно прошел государственные приемочные испытания. В настоящее время на базе СРТ изготовлен и проходит межведомственные испытания опытный образец турбогенератора мощностью 100 кВт, предназначенный для утилизации и преобразования в электрическую энергию потенциальной энергии природного газа, теряемой в настоящее время безвозвратно при дросселировании на ГРС [10].

## SUMMARY

*The article discusses the jet-reactive and vortex turbines as well as the possibility of their application as pneumatic drives of ball valves of gas mains and turbogenerators with the purpose to utilize the potential energy of compressed gas or steam. Some results of experimental investigations of jet-reactive turbines are presented.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ванеев С.М., Королев С.К., Ена В.П. Анализ конструктивных схем приводов шаровых кранов DN=300-1400 мм для компрессорных станций магистральных газопроводов // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету. - Кіровоград, 2000. - Вип. 7.

2. Язык А.В. Утилизация потенциальной энергии газа на газораспределительных станциях в детандерных установках (Обз. инфом. Сер. Использование газа в народном хозяйстве). – М.: ВНИИЭгазпром, 1988. – Вып. 4.
3. Пономаренко М.О., Костенко Д.А. Виробництво електроенергії на ГРС України з використанням енергії надмірного тиску газу // Нафтова і газова промисловість.-1994.- № 1.-С. 39-43.
4. Ковалев И.А., Ванеев С.М., Королев С.К. Пневмодинамический привод нового типа и его использование в целях энергосбережения //Технологические системы. Научные разработки и результаты исследований. - К., 2002.-№2(13).-С.114-118.
5. Ванеев С.М. Королев С.К., Рухлов Ю.Л., Федотов Ю.Т. Струйно-реактивный двигатель и возможности его использования // Химическое и нефтяное машиностроение. -1990. - № 6. -С.16-17.
6. Ванеев С.М., Королев С.К., Рухлов Ю.Л., Федотов Ю.Т., Бостан И.А. Струйно-реактивные двигатели для приводов шаровых кранов // Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты: теория, расчет, конструирование. Тематический сборник научных работ / Под ред. И.А. Ковалева.- К.: ИСДО, 1994.-С. 233-239.
7. Ванеев С.М. Исследования вихревой пневматической турбины для привода шарового крана // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. - 1999.– Вып.35.– С. 71-75.
8. Королев С.К., Ванеев С.М. Использование струйно-реактивной турбины в системах редуцирования природного газа // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. - 1999.– Вып.35.– С. 76-83.
9. Ванеев С.М. Газовые турбодвигатели на базе струйно-реактивных и вихревых турбин // Труды международной научно-технической конференции. - Харьков, 2000.
10. Королев С.К., Ванеев С.М. Исследование турбодетандерного агрегата на базе струйно-реактивной турбины мощностью 100 кВт.//Сб. науч. трудов, Харьков, 2003.- С.293-296.
11. Ванеев С.М., Марцинковский В.С. Создание турбогенераторов и турбоприводов на базе вихревых турбин для химических предприятий //Научно-технические новости. - 2004. – С.75-78.
12. Королев С.К., Ванеев С.М. Исследование вихревых и струйно-реактивных турбин. // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. – 2002. - Вып.42 - Т.2. – С. 136-141.
13. Ванеев С.М. Разработка и исследование вихревого пневмопривода с внешним периферийным каналом и сопловым аппаратом: Дис... канд. техн. наук. – М., 1986.
14. Ванеев С.М. Исследование вихревых пневматических турбин // Труды 8-й международной научно-технической конференции «Насосы-96», т.1. – Сумы: НПП «Мрия-1» ЛТД, 1996. – С. 288-296.
15. Ванеев С.М. О рабочем процессе вихревой пневматической турбины // Вестник СумГУ. – 1998. - №10. – С. 48-52.
16. Ванеев С.М. Структура потерь энергии и КПД в вихревой пневматической турбине // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. – 2000.- Вып.38, Т.2.– С. 22-28.
17. Ванеев С.М. Влияние отсекаателя на потери энергии в вихревой расширительной ступени. // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2000. - № 19. – С. 22-27.
18. Ванеев С.М. Расчет КПД вихревого рабочего процесса пневматической турбинной ступени с внешним периферийным каналом // Вестник Национального технического университета. - 2001. – Вып. 129, Ч. 2. – С. 315-324.
19. Ванеев С.М., Марцинковский В.С., Гриценуко В.Г., Овсейко И.В. Вихревые турбомашини для сжимаемых сред //Компрессорная техника и пневматика. - 2002. - №3.–С.2-7.
20. Королев С.К. Математическая модель газодинамики струйно-реактивной турбины // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение.–1999. - Вып.36. – С. 473-479.
21. 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.
22. Ванеев С.М. Расчет характеристик струйно-реактивной турбины // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. – 1999. - Вып.36.– С. 263-269.
23. Исследование механических и динамических характеристик пневмоприводов арматуры и оптимизация их конструкций: Отчет о НИР (ВНИИкомпрессормаш). Рук. темы С.М.Ванеев.- № ГР01890056751, Инв. № 190/89.- Сумы, 1989.- 89 с.
24. Пат. 20192 Україна, МКИ F02С3/00. Струминно-реактивна турбіна / Королев С.К., Ванеев С.М., Рухлов Ю.Л., Федотов Ю.Т. (Україна). - № А1 1829521; Заявл. 05.05.89; Опубл. 25.12.97. Бюл. № 6. – 2с.
25. Пат. 1829521 Россия, МКИ F02С3/00. Струйно-реактивная турбина / Королев С.К., Ванеев С.М., Рухлов Ю.Л., Федотов Ю.Т. (Украина). - № А1 1829521; Заявл. 05.05.89; Опубл. 7.06.99. – 6с.
26. А.с. 1747720 А1 Россия, МКИ F01D17/14. Устройство управления турбиной /Королев С.К., Федотов Ю.Т., Квачан С.А., Ванеев С.М., Євтушенко Л.Ф., Рухлов Ю.Л., Приходченко П.П. (Украина).–№ 4714764/06; Заявл. 04.07.89; Опубл. 15.07.92. Бюл. № 26. – 4с.
27. Декларационный патент на корисну модель. Установка для редукування тиску потоку / Ванеев С.М., Марцинковский В.С., Левченко В.Л. (Украина).- № 3997; Опубл. 15.12.04.

*Поступила в редакцию 14 декабря 2005 г.*