

ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ ЖИДКОСТНО-КОЛЬЦЕВЫХ МАШИН В КОМПРЕССОРНОМ РЕЖИМЕ И ИХ ТЕХНИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В.Н. Козин¹

Данная статья имеет ознакомительно-информативный характер и посвящена изучению жидкостнокольцевых компрессоров. В статье описываются наиболее характерные отрасли, где применяются эти компрессоры, а также приводятся отличия в методиках расчета вакуум-насоса и компрессора.

Автор описывает принципиальную схему экспериментального стенда, измерительные приборы и автоматику. Кроме того, описываются цель и методика проведения эксперимента и приводятся приборы для измерения поля скоростей и давлений в безлопаточном пространстве жидкостно-кольцевого компрессора.

1 ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Развитие химических и пищевых технологий в настоящее время требует создания компрессоров и вакуумных насосов, способных сжимать агрессивные и взрывоопасные газы без загрязнения их смазочными материалами. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют жидкостно-кольцевые машины (ЖКМ) – это ротационные машины объемного действия с внутренним сжатием.

Данный класс машин обладает следующими преимуществами: простота конструкции и высокая надежность; сравнительно низкая металлоемкость машины и всей установки; отсутствие необходимости в фильтрах для пыли и масла; отсутствие смазки и трущихся частей в рабочей полости машины; близкий к изотермическому процесс сжатия рабочего агента вследствие отвода тепла жидкостью; низкий уровень звукового давления; низкий уровень вибраций обуславливается полной уравновешенностью движущихся частей машины. В ЖКМ можно использовать различные по своим физико-химическим свойствам рабочие жидкости и за счет этого сжимать токсичные, взрывоопасные, легко разлагающиеся, полимеризующиеся и воспламеняющиеся газы, пары и газожидкостные смеси, в том числе агрессивные и загрязненные механическими примесями [1]. Известны случаи применения ЖКМ в составе агрегатов для откачки кислорода [2] и попутных газов при добыче полезных ископаемых.

В связи с этим ЖКМ получили широкое распространение в целлюлозно-бумажной, угольной, нефтегазовой, стекольной, пищевой, фармацевтической и других отраслях промышленности, в теплоэнергетике для откачки неконденсирующихся газов из конденсаторов [3]. Машины данного класса применяются для вентиляции шахтных сооружений в горной промышленности, а в последнее время в связи с возросшими требованиями к охране окружающей среды их начинают использовать в системах очистки воздуха от вредных примесей [4].

Недостатком ЖКМ является низкий изотермический КПД, достигающий при загнутых вперед лопатках 30 – 40 % (у крупных машин – до 52 %). Другой недостаток – значительный расход воды, больший, чем у компрессоров других типов, работающих при той же производительности, зато потребность в смазке в конструкциях с подшипниками качения очень мала.

¹ Аспирант, Сумский государственный университет.

ЖКМ разделяют на жидкостно-кольцевые компрессоры (ЖК) и жидкостно-кольцевые вакуум-насосы (ЖКВН). ЖК не так часто применяются в сравнении с ЖКВН и другими типами компрессоров. Этот момент можно объяснить исходя из следующих соображений. Одноступенчатые ЖК могут применяться при производительностях от 0,2 до 300 м³/мин с давлением нагнетания не выше 0,2 МПа. Более высокое давление достигается в многоступенчатых машинах, получаемых агрегатированием одноступенчатых. В этом диапазоне обычно применяются различные типы газодувок, ротационно-пластинчатые, ротационные с катящимся ротором, поршневые компрессоры, так как для них уже имеется разработанная теоретическая и экспериментальная база. Этот факт объясняется большей простотой определения геометрической полости сжатия, т.к. она определяется по объему, ограниченному твердыми частями компрессора. У ЖК же геометрическая полость сжатия определяется еще и формой жидкостного кольца, образующегося при вращении ротора. Форма жидкостного кольца зависит от многих факторов (режима работы, сжимаемого газа и пр.).

Определение формы жидкостного кольца при различных режимах работы компрессора является одной из основных и наиболее сложных задач при его проектировании, так как она определяет действительную производительность компрессора, а следовательно, и коэффициент подачи – одну из основных характеристик компрессора. Этому вопросу посвящены многие научно-исследовательские работы [5], [6], [7] и пр. Авторы этих работ предлагают различные подходы к решению этой задачи, но реальное совпадение полученных аналитических зависимостей с фактическими значениями наблюдаются не всегда. Это говорит о том, что математический аппарат разработан еще не совсем точно. Так, например, в методике В.А. Румянцева [6] для определения очертания жидкостного кольца предлагается находить радиус внутренней поверхности жидкостного кольца, разделив рабочую полость на три участка по углу поворота колеса – всасывания, сжатия и нагнетания. А согласно методике, предложенной И.А. Райзманом [7], форма жидкостного кольца определяется следующим образом: при фиксированном положении ячейки вдоль ее средней линии находится давление в жидкости на окружности рабочего колеса. Затем рассчитывается изменение давления вдоль цилиндра, ограничивающего рабочее колесо через определенный интервал дуговой протяженности, и в каждой точке определяется значение давления. Вдоль кривой, эквидистантной средней линии ячейки, определяется давление жидкости внутри ячейки. Точки на линиях, в которых давление жидкости становится равным давлению газа, соответствуют границе раздела между жидкостью и газом. Форма поверхности жидкости в ячейке, полученная расчетным путем, сравнивалась с формой, полученной экспериментально. В итоге была доказана достаточная сходимость результатов. Наибольшее расхождение наблюдалось на участках всасывания и обратного расширения. Это свидетельствует о наличии каких-то, еще не учтенных факторов, т.е. теория требует доработки. На сегодняшний момент эта работа наиболее полно раскрывает суть вопроса, особенно применительно к машинам, работающим в компрессорном режиме.

Вопросам создания математического аппарата по моделированию и оптимизации работы ЖКМ посвящена работа В.Ю. Бурмаки [8], но она относится к исследованию ЖКМ в режиме вакуум-насоса и без компрессии. Выводы, сделанные в этой работе, например, о наличии верхней границы величины относительного эксцентриситета $\bar{e} < 0,104$, при которой наблюдаются минимальные гидродинамические потери, или о полезности потери сцепления одной лопатки рабочего колеса с жидкостным кольцом, что приводит к дополнительному снижению

потерь в рабочем колесе и к увеличению объемов ячеек всасывания газа, неплохо было бы проверить при работе ЖКМ в компрессорном режиме.

Большой вклад в развитие ЖКМ вносят работы Ю.М. Вертепова [9], [10], [11] и пр. Все они направлены на модернизацию различных деталей и узлов ЖКМ, применение новых элементов и упрощение существующих. Ведь конструкция машины влияет как на ее гидродинамические потери (энергетические показатели), так и форму жидкостного кольца (расходные показатели). Так, например, работа [9] посвящена модернизации формы лопатки ЖКМ. Концу лопатки предана форма криволинейного клина, расширяющегося от выходной кромки к поверхности соединения выгнутой поверхности периферийного конца с вогнутой боковой поверхностью лопатки. Такая форма лопатки обеспечивает следующие преимущества:

- уменьшается мощность гидродинамических потерь за счет эффективного взаимодействия лопатки с рабочей жидкостью, что обеспечивает увеличение КПД;

- увеличивается ресурс работы за счет уменьшения нагрузок на лопатку и кавитационный износ ее выходной кромки, выгнутой кромки периферийного конца и поверхности ее соединения с выгнутой боковой поверхностью;

- увеличивается кавитационный запас во всем диапазоне рабочих давлений;

- увеличивается производительность работы.

В принципе, теория расчета ЖК аналогична теории расчета пластинчатых компрессоров и ЖКВН, но существуют некоторые особенности [7]:

- окружная скорость для вакуум-насосов выбирается в пределах $u=16 - 18$ м/с, тогда как для компрессора оптимальная окружная скорость по некоторым опытным данным составляет $23 - 24$ м/с;

- в компрессорах перепад давлений значительно выше, чем у вакуум-насосов, поэтому и прочность узлов компрессора должна быть большей.

Итак, на основе краткого анализа можно сделать следующий вывод о том, что до сих пор для ЖК не решены вопросы об оптимальном размещении всасывающего и нагнетательного окон, определении формы жидкостного кольца, оптимальной величины относительного эксцентриситета и величины погружения ротора в жидкостное кольцо в месте максимального сечения серповидного участка, хотя для ЖКВН уже имеется достаточная теоретическая и экспериментальная база. Исследованием этого вопроса занимается автор. Для решения этого вопроса нужно выбрать математическую модель работы ЖКМ, например, разработанную И.А. Райзманом [7] для ЖКМ, а затем провести экспериментальные исследования ЖК и уточнить ее.

В настоящей работе ставятся следующие задачи:

- 1 Экспериментальные исследования зависимости расходных и энергетических показателей машины от геометрических, кинематических и режимных параметров.

- 2 Экспериментальные исследования гидродинамических особенностей течения рабочей жидкости в рабочей полости ЖКМ с целью уточнения математической модели.

- 3 Анализ факторов, которые определяют расходные и энергетические показатели ЖКМ.

- 4 Уточнение и дальнейшая разработка математической модели движения потока жидкости в рабочей полости ЖК.

- 5 Проверка полученных научных результатов путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных.

- 6 Создание экспериментального стенда.

В соответствии с постановкой задач настоящая работа посвящена созданию экспериментального стенда, оснащенного средствами диагностики.

2 СХЕМА И ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

В лаборатории кафедры технической теплофизики СумГУ сконструирован экспериментальный стенд «ВВН-3» для исследования характеристик ЖКМ в компрессорном режиме, конструктивная схема которого представлена на рисунке 1.

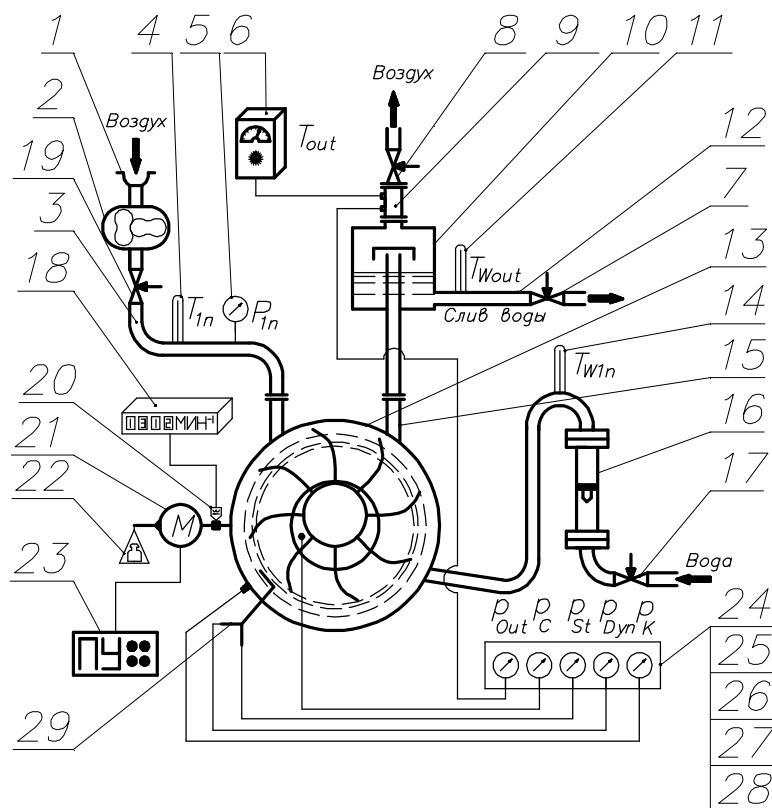


Рисунок 1 – Конструктивная схема экспериментального стенда для исследования работы жидкостно-кольцевой машины в компрессорном режиме

Экспериментальная установка для исследований ЖКМ в компрессорном режиме (рис. 1) состоит из вакуум-компрессора 13 марки ВВН-3, установленного на общей раме вместе с электродвигателем 21. В качестве привода ЖКМ применяется электродвигатель постоянного тока П-71 мощностью 19 кВт, что дало возможность плавной регулировки частоты вращения ротора в диапазоне от 0 до 2500 об/мин.

Применение в электродвигателе смешанного возбуждения позволяет поддерживать стабильную скорость вращения ротора при изменении нагрузки, в то время как наличие последовательной обмотки возбуждения исключает возможность аварии при случайном обрыве параллельной обмотки. Для регулирования частоты вращения ротора используется реостат в якорной цепи, управляемый электродвигателем с редуктором кнопками с пульта 23. Вал электродвигателя соединяется с валом ЖКМ посредством упругой втулочно-пальцевой муфты. Ротор

электродвигателя установлен на шарикоподшипниковые опоры, а к его корпусу крепится рычаг, который своим концом опирается на чашу весов 22 таким образом, что двигатель представляет собой мотор - весы, с помощью которых производится измерение эффективного крутящего момента на валу машины. В качестве весов используются почтовые весы ПВ-15 с диапазоном измерений 40г - 15 кг. Цена деления весов составляет 1г (при массе до 6 кг) и 2 г при массе свыше 6 кг. На валу электродвигателя установлена крыльчатка 20, которая генерирует на крыльчатках датчика электрические импульсы. Эти импульсы регистрируются частотомером 18 электронно-счетным типа 43-32, который способен определять частоту вращения ротора с точностью до 0,1 об/мин.

В качестве рабочего газа использовался воздух, всасываемый непосредственно из помещения испытательного бокса; в качестве рабочей жидкости - вода, расход которой через машину может варьироваться в пределах 1 - 8 л/мин, а температура на входе находится в пределах +10 - +20°C. Удаление отработанной воды из водоотделителя осуществляется сливом под действием давления нагнетания ЖКМ.

При испытании ЖКМ всасываемый воздух (см. рис. 1) через сетчатый фильтр 1, ротаметр газовый 2 типа РГ-250-1 и дроссельную задвижку 19 поступает во всасывающий трубопровод 3. Температура газа во всасывающем трубопроводе измеряется электрическим термометром 4 типа ТЭТ-2. Прибор ТЭТ-2 имеет несколько диапазонов измеряемых температур, максимальный из которых от -40 до +80°C; цена деления 0,2 °С. Давление газа во всасывающем патрубке может регулироваться задвижкой 19 и измеряется вакуумметром образцовым 5 модели ВО 1227 класса точности 0,16. Задвижка 19 необходима для создания вакуума при запуске вакуум-насоса с целью уменьшения пусковых нагрузок на двигатель 21.

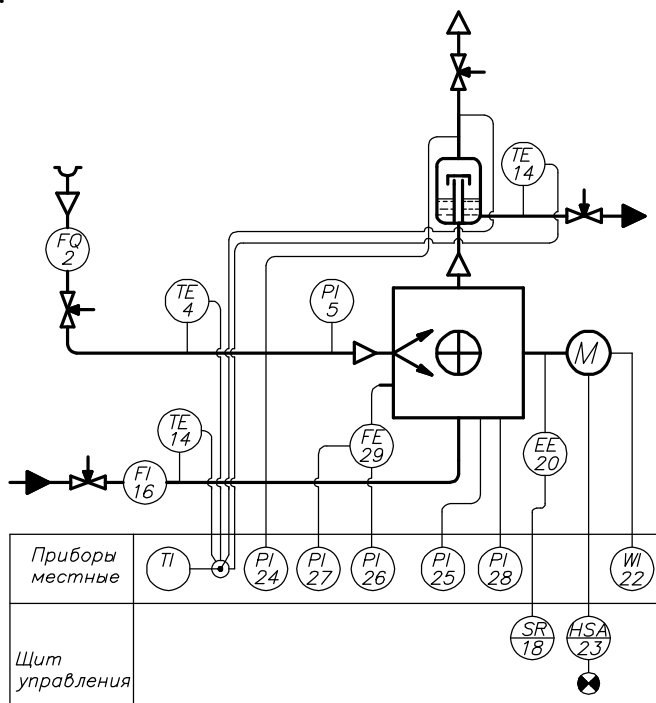


Рисунок 2 – Схема измерения и автоматики экспериментальной установки

Из трубопровода 3 воздух через всасывающее окно поступает в

рабочую полость вакуум-компрессора 13. После окончания процесса сжатия газожидкостная смесь через нагнетательное окно вытесняется в нагнетательный патрубок 15. Затем через отделитель жидкости 10 вода по нижнему сливному шлангу, преодолевая сопротивление задвижки 7, удаляется в канализацию, а газ, проходя через переходник 9, дроссельную задвижку 8 выбрасывается в атмосферу. Температура газа на выходе из отделителя жидкости измеряется термометром 6, а температура жидкости - термометром 11. Оба термометра электрические транзисторные типа ТЭТ-2. Переходник 9 необходим для подключения измерительных приборов 6 и 24 для измерения соответственно температуры и давления газожидкостной смеси на выходе из отделителя жидкости 10 (температуры и давления нагнетания).

Дроссельная задвижка 8 необходима для создания избыточного давления в нагнетательном трубопроводе 15 с целью исследования работы вакуум-компрессора 13 в компрессорном режиме. Дроссельная задвижка 7 необходима для поддержания гарантированного избыточного урона в отделителе жидкости с целью предотвращения попадания компрессированного воздуха в сливной тракт, а следовательно, и уменьшения эффективности работы машины.

Для образования жидкостного кольца рабочая жидкость - вода из магистрального трубопровода через регулировочный вентиль 17, ротаметр жидкостный 16 типа РС-5 подается в область сжатия ЖКМ. Температура жидкости на входе в машину измеряется термометром 14 типа ТЭТ-2. Часть жидкости подается в машину через торцевое уплотнение с целью снижения в нем трения.

Для измерения поля скоростей и давлений используется комбинированный датчик 29 полного и статического давления типа Пито - Прандтля (рис.1, рис. 3а), штуцеры которого через импульсные трубки соединяются с образцовыми пружинными манометрами. Манометр 26 для измерения статического давления в безлопаточном пространстве типа МО 1215 с пределами измерения 0 - 2,5 кгс/см² и класса точности 0,4. Комбинированный датчик 29 ввинчивается при помощи штуцера в отверстие обечайки. Ориентация его по потоку жидкости осуществляется вручную по максимуму показаний манометра полного давления. Глубина погружения через металлическую торцевую стенку, регулировка его по углу и по глубине погружения осуществляются посредством координатника конструкции ЛПИ.

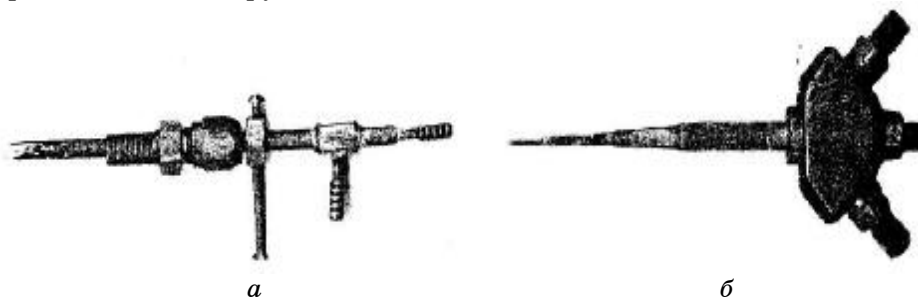


Рисунок 3 - Датчики, используемые для исследования поля скоростей и давлений в безлопаточном пространстве:

а - комбинированный датчик типа Пито - Прандтля; б - трехканальный зонд

Для измерения полного давления используется манометр образцовый МО 1215 с пределами измерения 0 - 2,5 кгс/см² и класса точности 0,4 позиция 27. Давление газа в межлопаточной ячейке ротора измеряется вакуумметром образцовым 25 модели МО 1215 класса точности 0,4. А для измерения давления на внутренней стенке корпуса применяется

манометр 28 модели МО 1215 с пределами измеряемых давлений 0 - 2,5 кгс/см² класса точности 0,4.

Пределы измеряемых величин и класс точности приборов подбирается с целью получения минимальных значений ошибок измерений. Измеряемая величина определяется путем обработки значений не меньше пяти ее замеров для исключения получения грубых ошибок ("промахов"). Шаг замеров должен обеспечивать получение целостной картины измерения.

Кроме того, в стенде предусмотрена возможность изменения величины эксцентриситета. Для этого имеется три стальные сменные обечайки корпуса с различными величинами относительного внутреннего диаметра D_3 / D_2 , соответственно равными 1,11; 1,15; 1,19, что дает возможность обеспечить максимальные величины относительного эксцентриситета рабочего колеса соответственно 0,11; 0,15; 0,19.

В виду сложности протекающих в ЖКМ динамических процессов и с целью наглядного сопоставления результатов, полученных аналитически относительно формы жидкостного кольца, с фактической его величиной предусмотрена прозрачная сменная торцевая крышка.

3 ВЫВОДЫ

В Украине за последние 5 лет производство ЖКМ возросло на 10% [8]. На ОАО «Сумское НПО им. М.В.Фрунзе» количество новых моделей ЖКМ увеличилось на 15%. Однако количественный рост объема выпуска ЖКМ практически не привел к повышению их эффективности, существенному расширению спектра новых конструкций и расширению диапазона работы. Это объясняется недостаточностью разработанной теории, методов расчета и количества экспериментальных данных. В настоящее время для проектирования ЖКМ, работающих в компрессорном режиме (ЖК), фактически отсутствуют надежные средства, позволяющие создавать машины в строгом соответствии с заданными параметрами, проводить их поверочные расчеты. Для получения минимальной удельной мощности и максимального эксергетического КПД в настоящее время в каждом конкретном случае опытным путем подбирают соответствующие величины геометрических и кинематических параметров машины, т.е. производят стендовую доводку, которая не всегда приводит к желаемым результатам. Поэтому в настоящее время существует острая потребность в эффективных методах анализа, способных обеспечить создание новых конструкций ЖК в соответствии с заданными условиями работы при минимальных затратах материальных средств и времени с одновременным достижением высокой эффективности спроектированных машин. С другой стороны, совокупность опытных данных и их теоретическое обобщение должны предоставить возможность проектирования работы ЖК с различными геометрическими соотношениями и на различных режимах работы, что даст возможность прогнозирования работы многоступенчатых компрессорных систем.

На стенде предполагается получить новые результаты, которые позволят расширить физические представления о процессах в ЖК, получить количественные данные, необходимые для создания новых, более совершенных машин.

SUMMARY

This article carries an acquainting-informing character and it's devoted to the research of liquid ring compressors. The main industries are described in the article, where these type of machines are used. Also the article is represented the differences in the methods of calculation of vacuum pump and compressors. It describes chart of experimental stand, measuring devices and automation of principle too.

In addition, a target and method of conducting of experiment are described and some special devices for measuring of the fields of speeds and pressures in without blade space of liquid ring compressor are brought over.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Караганов Л.Т., Григоров В.П., Лысенко Г.В., Прямыцын Е.И. Определение предпочтительной области применения жидкостно-кольцевых вакуум-насосов и агрегатов на их базе по давлениям всасывания // Сборник научных трудов.- Сумы: ВНИИкомпрессормаш, 1974.-Вып. 6. -С. 64-69.
2. Иванов Б.А., Караганов Л.Т., Мельников Е.А., Щепотьев Н.А. Исследование способов безопасной откачки кислорода механическими масляными насосами // Труды III Всесоюзной научно-технической конференции по компрессорному машиностроению. - Казань, 1974. - С. 327-329.
3. Бурмака В.Ю. Анализ и совершенствование методов расчета жидкостно-кольцевых компрессорных машин // Совершенствование турбоустановок методом математического и физического моделирования: Сб. научн. трудов. - Харьков: ИПМаш НАН Украины, 2000. - С. 475-479.
4. Тарасова Л. А., Парадеев Д. С, Трошкин О. А. Возможность использования водокольцевой воздуходувки в качестве ступени газоочистки // Инженерная защита окружающей среды: Материалы 5-го Международного симпозиума молодых ученых, аспирантов и студентов. - М.: МГУИЭ, 2002. - С. 255-257.
5. Пфлейдерер К. Лопаточные машины для жидкостей и газов. Изд. 4-е, перераб. - М.: Машгиз, 1960. – 684 с.
6. Головинцов А.Г., Румянцев В.А. и др. Ротационные компрессоры. – М.: Машиностроение, 1964. – 290 с.
7. Райзман И.А. Жидкостно-кольцевые вакуумные насосы и компрессоры. – Казань, 1995. – 258 с.
8. Бурмака В.Ю. Исследование гидродинамики потока жидкости в рабочей полости жидкостно-кольцевой компрессорной машины /Дис... – Сумы: СумГУ, 2004. – 197 с.
9. Патент України № 53303 МПК F04c 7/00, 19/00 Лопатка робочого колеса рідиннокільцевої машини/ Вертепов Ю.М. Опубл. 15.01.2003. Бюл. №1.
10. АС №1481472 МПК F04c 7/00, 19/00 Жидкостно-кольцевая машина/ В.М. Арсеньев, Ю.М. Вертепов и др.; Опубл. 23.05.89 Бюл. 19.
11. Патент України № 7483 МПК F04c 7/00, 19/00 Рідиннокільцева машина / Вертепов Ю.М.; Опубл. 15.06.2005. Бюл. №6.

Поступила в редакцию 27 сентября 2006 г.