

ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет»

Направление подготовки -35.04.06 Агроинженерия

Магистерская программа – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

Институт механизации и технического сервиса

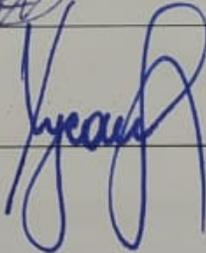
Кафедра машин и оборудования в агробизнесе

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИ)**

**ТЕМА: Исследование работы водокольцевого вакуумного насоса с
предвключенным эжектором**

Студент магистратуры
Научный руководитель.
к.т.н., доцент





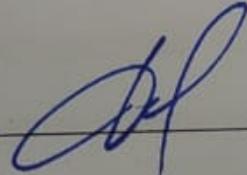
Шарафиев Р.Р.

Хусаинов Р.К.

Обсужден на заседании кафедры и допущен к защите

Протокол № 7 от 01 февраля 2021г

Заведующий кафедрой машин и
оборудования в агробизнесе



Халиуллин Д.Т.

Казань 2021

АННОТАЦИЯ

выпускной квалификационной работы (магистерской диссертации), выполненной на тему: «Исследование работы водокольцевого вакуумного насоса с предвключенным эжектором», представленной на соискание степени магистра по направлению – Технологии и средства механизации сельского хозяйства.

Диссертация посвящена исследованию работы водокольцевого вакуумного насоса с предвключенным эжектором. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований представлена математическая модель движения пульсирующего активного потока воздуха, позволяющие обосновать геометрические и режимные параметры в эжекторе водокольцевого вакуумного насоса, определены рациональные геометрические и режимные параметры эжектора вакуумного насоса с пульсирующим движением активного потока.

В различных технологических процессах сельского хозяйства и промышленности используются вакуумные насосы. Масляные насосы, широко применяемые в настоящее время для получения вакуума, обладают повышенной миграцией паров масла в откачиваемую среду. Это значительно снижает степень чистоты вакуума и приводит к получению некачественного продукта и даже его порче.

Из систем безмасляной откачки особо необходимо выделить жидкостно-кольцевые вакуумные насосы, (ЖКВН). Большое количество технологических процессов сельскохозяйственного производства проводятся при рабочем давлении более низком, чем создают эти насосы. Высокоэффективными средствами снижения давления при сохранении подачи являются эжектора со стационарным и пульсирующим движением активного потока.

Диссертация написана на русском языке, состоит из введения, четырех глав, общих выводов и содержит 65 страниц машинописного текста, в том числе 36 рисунков, 2 таблицы, 31 наименований использованной литературы и 3 страниц приложений.

ABSTRACT

final qualifying work (master's thesis), performed on the topic: "Research of the operation of a liquid ring vacuum pump with an upstream ejector", presented for a master's degree in the direction - Technologies and means of agricultural mechanization.

The thesis is devoted to the study of the operation of a liquid ring vacuum pump with an upstream ejector. Based on the results of theoretical and experimental studies, a mathematical model of the movement of a pulsating active air flow has been developed, which makes it possible to substantiate the geometric and operating parameters in the ejector of a vacuum unit, rational geometric and operating parameters of the ejector of a vacuum unit with a pulsating movement of an active flow are determined.

Vacuum pumps are used in various technological processes in agriculture and industry. Oil pumps, which are currently widely used to obtain a vacuum, have an increased migration of oil vapors into the pumped out medium. This significantly reduces the degree of vacuum purity and leads to a poor quality product and even spoilage.

Of the systems of oil-free pumping, it is especially necessary to single out liquid ring vacuum pumps (ZhKVN). A large number of technological processes in agricultural production are carried out at a working pressure lower than these pumps create. Ejectors with stationary and pulsating active flow are highly effective means of reducing pressure while maintaining flow.

The thesis is written in Russian, consists of a reference, four chapters, general conclusions and contains 65 pages of typewritten text, including 36 figures, 2 tables, 31 references and 3 pages of appendices.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	6
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ...	10
1.1 Обзор и анализ эжекторов вакуумного насоса со стационарным и пульсирующим движением активного потока, используемых в сельском хозяйстве	10
1.1.1. Вклад отечественных и зарубежных ученых в развитие научных знаний о процессах, проходящих при пониженном давлении среды, в сельском хозяйстве	18
1.2 Конструктивные схемы и особенности работы эжекторов со стационарным и пульсирующим движением активного потока.....	19
1.2.1 Конструктивные схемы и особенности работы стационарных струйных аппаратов с устройствами стабилизации режимов их работы.....	19
1.2.2 Эжектора с регулирующим элементом, совершающим вращательное движение (вращательные эжекторы).....	26
1.3.3 Эжектора с регулирующим вращательно-колебательным элементом, (комбинированные эжекторы).....	27
1.3 Основные расчетные зависимости и анализ исследований эжекторов со стационарным и пульсирующим движением активного потока.....	28
1.3.1 Некоторые сведения по газовой динамике.....	28
Выводы по разделу 1.....	33
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭЖЕКТОРА ВАКУУМНОГО АГРЕГАТА С ПУЛЬСИРУЮЩИМ И СТАЦИОНАРНЫМ ДВИЖЕНИЕМ АКТИВНОГО ПОТОКА	34
2.1 Основные положения работы эжекторов с пульсирующим движением активного потока.....	34
2.2 Теория движения воздушного потока в камере смешения эжекторе вакуумного агрегата с пульсирующим движением активного потока.....	38
2.3 Теоретические зависимости течения воздуха в эжекторе	40
Выводы по разделу	43

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОКОЛЬЦЕВОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА.....	44
3.1 Проведение экспериментальных исследований и математическое планирование экспериментов эжектора вакуумного агрегата с пульсирующим и стационарным движением активного потока.....	44
3.2 Разработка и изготовление экспериментальных лабораторных установок.....	45
3.3 Контрольная аппаратура и измерительные приборы.....	49
3.4. Методика проведения экспериментальных исследований эжектора вакуумного агрегата с пульсирующим движением активного потока.....	50
3.4.1 Определение основных режимных и геометрических параметров эжекторов вакуумного агрегата с пульсирующим движением активного потока	50
Выводы по разделу	51
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	52
4.1. Анализ результатов экспериментальных исследований вакуумного водокольцевого насоса ВВН-0,25.....	52
4.2. Зависимость подачи (Q_2) водокольцевого вакуумного насоса с предвключенным стационарным (ВВН-0,25Э) и пульсирующим (ВВН- 0,25ЭП) эжектором от величины входного давления (p_2).....	53
4.3. Зависимость потребной мощности N водокольцевого вакуумного агрегата со стационарным и пульсирующим движением активного потока от величины входного давления p_2	55
Выводы по разделу	56
Общие выводы.....	57
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	58
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	62
ПРИЛОЖЕНИЕ А	63
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	64
ПРИЛОЖЕНИЕ В	65

ВВЕДЕНИЕ

Современное сельскохозяйственное производство, его одна из главных отраслей - животноводство, требует интенсификации производственных процессов, снижения себестоимости производимой продукции. Для этого необходимо создание эффективного сельскохозяйственного оборудования [3,28,29] и оборудование смежных отраслей применение технологий на базе современных достижений науки и техники.

Развитие большинства отраслей сельскохозяйственной, пищевой, перерабатывающей промышленности связано с интенсивным использованием вакуумной техники. В различных технологических процессах сельского хозяйства и промышленности используются вакуумные насосы, позволяющие откачивать широкий спектр газов и парогазовых смесей.

Вакуум имеет не маловажную роль при промывке доильной установки. После заключительного цикла ополаскивания, во время сушки, в молокопроводе и молокоборнике создается вакуум, под действием которого начинается интенсивное испарение жидкости в молокопроводе (вакуумное обезвоживание). В процессе его выделяются пузырьки, которые срывают с поверхности молокопровода твердые частицы грязи, что способствует улучшению качества промывки молокопровода.

Доильных установках используются различные типы вакуумных насосов.

Масляные насосы, широко используемые в настоящее время для получения вакуума, обладают повышенной миграцией паров масла в откачиваемую среду. Это значительно снижает степень чистоты вакуума и приводит к получению некачественного конечного продукта и даже его порчи [19].

Из систем безмасляной откачки особо необходимо выделить жидкостно-кольцевые вакуумные насосы (ЖКВН). Они полностью соответствуют высоким требованиям к чистоте вакуумируемой среды, конструктивно просты, надежны в эксплуатации, характеризуются невысоким уровнем шума и вибрации при работе. Процессы сжатия газа происходят с интенсивным теплообменом и близки к изотермическому.

Большое количество технологических процессов сельскохозяйственного производства проводятся при рабочем давлении более низком, чем создают водокольцевые насосы. Это необходимо для вакуумной очистки доильного оборудования, при проведении ремонтных работ и т.д. Для снижения давления объемных вакуумных насосов, стабилизации вакуума создаваемого ими, принимаются меры по снижению достигаемых остаточных давлений [21].

Такими высокоэффективными средствами интенсификации производства являются эжектора со стационарным и пульсирующим движением активного потока, а также технологические процессы с их использованием.

Эжектора получили широкое распространение практически во всех отраслях промышленности и сельского хозяйства. Их принципиальной особенностью является повышение давления эжектируемого потока без непосредственной затраты механической энергии при исключительной простоте конструкции. В последнее время особенно широко стали использоваться эжектора с пульсирующим движением активного потока, основу которых представляют нестационарные режимы течения взаимодействующих в них потоков [4].

В эжекторах с пульсирующим движением активного потока, нестационарные режимы создаются преднамеренно, например, для повышения коэффициента эжекции, интенсификации теплоотдачи и т.п. В ряде случаев возникает необходимость борьбы с пульсациями для недопущения резонансных явлений и снижения шума.

Пульсирующие течения весьма многообразны. Это многообразие связано с увеличенным количеством чисел подобия, определяющих режим пульсирующего течения. Если для стационарного потока обычно используются приведенная скорость и число Рейнольдса, для пульсирующего течения к ним добавляются еще относительная частота и относительная амплитуда пульсаций.

Таким образом, проблема разработки экспериментальных и расчетных методов исследования турбулентных течений в пульсирующих и некоторых видов стационарных потоков в эжекторах, выявление механизмов

взаимодействия газодинамических и гидродинамических процессов в них, являются в настоящее время весьма востребованными.

Цель работы. Исследование влияния предвключенного эжектора на технологические характеристики водокольцевого вакуумного насоса

Задачи исследования.

1. Провести анализ существующих конструкции эжекторов со стационарным и пульсирующими потоками.

2. Установить рациональные конструктивные параметры и режимы работы водокольцевого вакуумного насоса с предвключенным эжектором.

3. Провести лабораторные исследования вакуумного водокольцевого насоса при разных температурах рабочей жидкости и давлениях.

4. Провести лабораторные исследования вакуумного водокольцевого насоса с предвключенным стационарным и пульсирующим эжектором

Объект исследования. Новые эжектора с шариковым прерывателем активного потока, работающие в составе жидкостно-кольцевых вакуумных насосов.

Предмет исследований. Рабочий процесс взаимодействия воздушных потоков в эжекторах с пульсирующим движением активного потока, работающие в составе жидкостно-кольцевых вакуумных насосов

Методология и методика исследования. При исследовании водокольцевого вакуумного насоса с предвключенным эжектором были выполнены на основе планирования экспериментов и при анализе опытных данных использовалась программ Microsoft Excel.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическую и практическую значимость работы составляет совокупность сформулированных научных положений и результатов экспериментальных исследований по обоснованию использования эжекторов в составе водокольцевого вакуумного насоса.

Публикации. Основное содержание научной работы опубликовано: в 2 статьях.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации обсуждены и доложены на ежегодных научно-технических конференциях Казанского ГАУ (2015 -2020 гг.).

Структура и объем работы. Диссертация написана на русском языке, содержит введение, пять глав, общие выводы и 70 страниц машинописного текста. При этом включены 23 рисунков, 2 таблиц, список из 36 наименования литературы, а также 3 страницы приложений.

,

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Обзор и анализ эжекторов вакуумного насоса со стационарным и пульсирующим движением активного потока, используемых в сельском хозяйстве

Развитие сельскохозяйственного производства требует последовательной и повсеместной интенсификации производственных процессов, снижения производственных затрат. Это требует создания оборудования высокого качества, использования новейших технологий на основе современной науки и техники. Все создаваемые оборудования должны иметь наименьшие энергозатраты и невысокую металлоемкость [3,8,28,29].

В настоящее время наибольшее распространение в сельскохозяйственном производстве получили жидкостнокольцевые (ЖКВН). При использовании в качестве рабочей жидкости воды они получили название - водокольцевые насосы (ВВН) [5,6,19].

Все жидкостнокольцевые машины (ЖКВН) подразделяются на вакуумные насосы (ЖВН) и компрессоры (ЖК). Оба типа машин используются при работе предвключенных струйных аппаратов. Классическими струйными аппаратами являются эжекторы и инжекторы. Эжектор откачивает, а инжектор нагнетает любую среду. Ни конструктивно, ни по принципу действия они не отличаются друг от друга. Однако между ними имеются существенные различия, определяющие назначение и выбор аппарата (эжектор, инжектор).

1. Вакуумные насосы работают в широком диапазоне давлений всасывания, для отечественных ЖВН расчетным является режим вакуума, указанный в ОСТ 26-12-1113-74. Компрессор должен рассчитываться на определенную степень сжатия, поэтому расчетные условия ЖВН и ЖК разные. Компрессор должен рассчитываться на определенную степень сжатия, поэтому расчетные условия ЖВН и ЖК разные. Это определяет различные конструктивные формы аппаратов, в частности, более прочная конструкция вала ротора ЖК.

2. В ЖВН при любой степени сжатия наибольший перепад давлений не превышает 0,1 МПа. У ЖК перепад давлений значительно больше.

3. Увеличение вакуума при постоянной объемной подаче приводит к снижению массовой подачи. Возрастание работы сжатия сопровождается снижением количества сжимаемого газа, в результате чего мощность ЖВН в широком диапазоне работы остается примерно постоянной. У компрессора же масса сжимаемого газа меняется незначительно, и, рост степени сжатия приводит к резкому увеличению потребляемой мощности. При одинаковой объемной подаче мощность двигателя у ЖК в 1,5-2 раза больше, чем у ЖВН.

4. Давление на выходе вакуумного насоса не превышает атмосферное, и водоотделитель ЖВН не воспринимает перепада давлений. У ЖК водоотделитель находится под давлением и должен выполняться в соответствии с требованиями Гостехнадзора.

Из сказанного следует, что ЖК могут использоваться как вакуумные насосы. Однако ЖВН использоваться как компрессоры не могут.

Выпускаемые в настоящее время вакуумные насосы: от ВВН-0,3, с подачей $0,3 \text{ м}^3/\text{мин}$ при номинальном 50%-м вакууме, до ВВН-50, с подачей $50 \text{ м}^3/\text{мин}$ и том же вакууме. В централизованных вакуумных установках (ЦВУ) на фермах КРС большей частью применяются насосы ВВН-6 и ВВН-12. Первый предназначен для использования на фермах с поголовьем 100...200 коров, второй - на фермах с поголовьем 200...400 коров.

Отличительными особенностями водокольцевых вакуумных насосов является то, что сжатие воздуха происходит жидкостным кольцом, и с помощью лопаточного рабочего колеса приводится в движение, который эксцентрично расположен в корпусе [30,31].

В начале пуска насос до оси заполняется жидкостью, который расположен горизонтально.

Во время вращения лопастей рабочего колеса жидкость отбрасывается к корпусу, и между жидкостным кольцом и ступицей рабочего колеса образуется пространство в виде серпа, поделённое лопастями на рабочие ячейки, от зависимости угла поворота рабочего колеса изменяется объём. При повороте

рабочего колеса объём рабочих ячеек меняется в сторону увеличения, и соединяется со всасывающим окном которое через него заполняются откачиваемым воздухом. При максимальном объёме рабочей ячейки происходит отсоединение от окна всасывания. Дальнейший поворот рабочего колеса приводит к уменьшению объёма рабочей ячейки, в котором происходит сжатие воздуха. Определенный угол поворота рабочей ячейки подсоединяется с нагнетательным окном, и из-за уменьшения объёма рабочей ячейки воздух вытесняется через нагнетательное окно в нагнетательный патрубок.

При сжатии воздуха жидкостью в вакуумном водокольцевом насосе между жидкостью и сжимаемым воздухом происходит хороший теплообмен, и наибольшая часть тепла сжатия отводится от воздуха. Для поддержания стабильной температуры жидкостного кольца, периодически подается холодная жидкость. Излишняя жидкость через нагнетательное окно удаляется из жидкостного кольца и трубопровод в отделитель жидкости [4].

При отсутствии органов газораспределения и наличие жидкостного кольца дает возможность насосу откачивать воздух, который содержит пары, капельную жидкость, твёрдые инородные включения. Для откачки агрессивных газов, с помощью жидкостно-кольцевых вакуумных насосов, необходим подбор рабочей жидкости.

Большое количество технологических процессов сельскохозяйственного производства проводятся при рабочем давлении более низком, чем создают водокольцевые насосы. Это необходимо для вакуумной очистки доильного оборудования, при проведении ремонтных работ и т.д. Для снижения давления объемных вакуумных насосов, стабилизации вакуума создаваемого ими, принимаются меры по снижению достигаемых остаточных давлений такие как: последовательное соединение двух и более насосов, использование многоступенчатых насосов и т.п. Такими мерами для вакуумных водокольцевых насосов являются использование рабочей жидкости с меньшим, чем у воды давлением насыщенных паров, применение двух ступеней в одном агрегате. Все отмеченные меры являются дорогостоящими и малоэффективными. Для снижения давления всасывания и стабилизации вакуума перед насосами

устанавливают предвключенные эжекторы - струйные аппараты, которые могут работать самостоятельно.

За более чем столетний период, прошедший с момента создания эжекторов, широко используемых в сельскохозяйственном производстве и промышленности, достигнут значительный прогресс как в области совершенствования конструкций аппаратов, так и в разработке методов их расчета. Конструкционное совершенствование аппаратов позволило увеличить за последний период КПД с 5...8% до 35...40% и выше [1,21,30,31].

В сельскохозяйственном производстве эжектора используются: в молочном производстве [25], пищевой, перерабатывающей, для создания микроклимата. Эжектора применяются в нефтехимической, нефтегазодобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности [24]. Они позволяют обеспечивать возможность аккумуляции и использования энергии до температур и давления, ниже окружающей среды [5,9,24].

Повышение эффективности комбинированного вакуумного агрегата водокольцевой вакуумный насос - эжектор, заключается в значительном снижении создаваемого остаточного давления при сохранении его объемной подачи.

Впервые водокольцевые вакуумные насосы с предвключенными эжекторами были разработаны фирмой «Siemens». Этой фирмой, а также фирмами «Nash» (США), «Sihl» и «Wedag» (Франция) выпускается широкий ассортимент насосов с эжекторами. Проведенные нами исследования подтвердили эффективность работы предвключенного эжектора.

На рисунке 1.2 представлен вакуумный агрегат с предвключенным эжектором, состоящий из эжектора 1, прикрепленного к всасывающему патрубку 2, с водосборником 3. Насос 2, соединен посредством муфты 4 с электродвигателем 5, который размещен на станине 6.

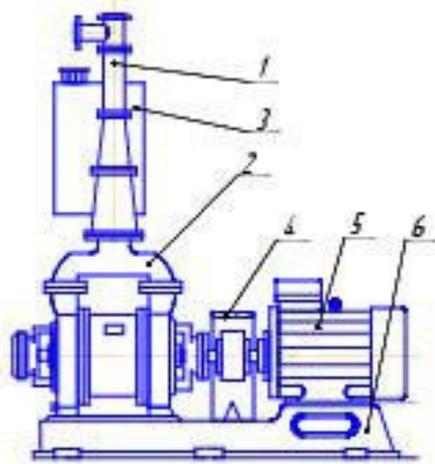


Рисунок 1.2 - Вакуумный агрегат с предвключенным эжектором

Предвключенные воздушные эжекторы работают за счет перепада давления воздуха в атмосфере и разрежения, создаваемого насосом.

Предвключенные эжекторы устанавливаются на всасывающем патрубке объемных, в чаще всего водокольцевых, насосов. На рисунке 1.3 показаны зависимости подачи Q от давления P_N вакуумных водокольцевых насосов, на рисунке 1.4 приведены характеристики совместной работы предвключенного газового эжектора и водокольцевого вакуумного насоса ВВНЭ-12.

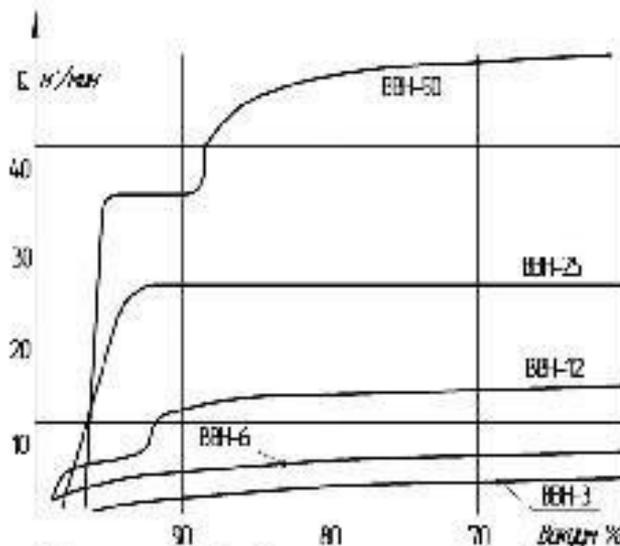


Рисунок 1.3 - Зависимость $Q = f(P_N)$ вакуумных водокольцевых насосов

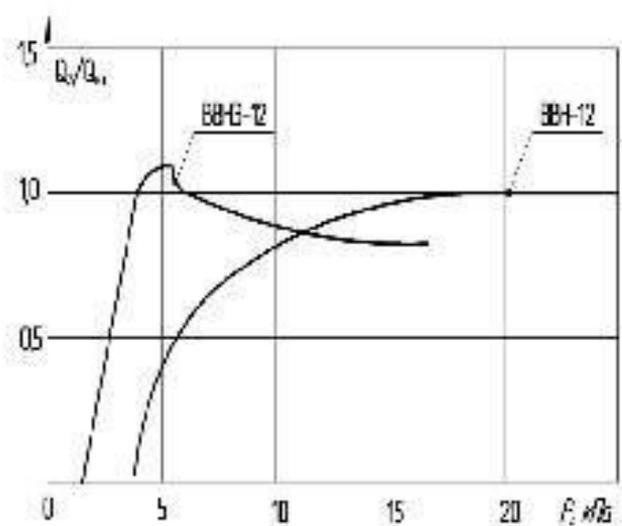


Рисунок 1.4 - Характеристики совместной работы предвключенного газового эжектора и водокольцевого вакуумного насоса

На рисунках 1.5 и 1.6 показаны вакуумные жидкостно-кольцевые насосы с предвключенными эжекторами, изготавливаемыми фирмами «Nash» и «Wedag» с вертикальным и горизонтальным расположением эжекторов, ставшими

прототипами наших разработок. Аналогичные конструкции объемных вакуумных насосов с предвключенным эжектором разработаны и выпускаются фирмами «Siemens», а также «Sihi».

Предвключенный эжектор с помощью всасывающего патрубка переходной камеры соединяется с откачиваемым объемом. Специально спрофилированное сопло Лавалья рабочего газа сообщается с атмосферой или нагнетательной частью водокольцевого насоса.

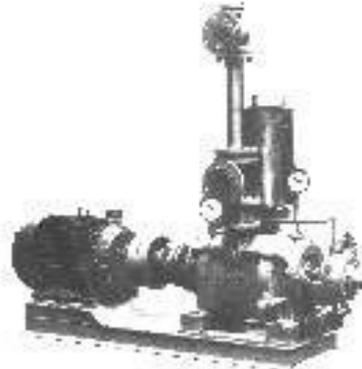


Рисунок 1.5 – Вакуумный насос CL 708 «Nash» с ПЭ



Рисунок 1.6- Вакуумный насос LHG 14 «Wedag» с ПЭ

Принцип работы предвключенного эжектора и определение его параметров широко представлен в открытой печати. Отметим, что в работах библиографический список наиболее полный. При минимальном расходе рабочей жидкости понятие эффективности не подходит для предвключенного эжектора. Расход рабочего воздуха в эжекторе, то есть атмосферного воздуха не имеет ограничения, и на его сжатие эжектора не затрачивается энергия. Предвключенный эжектор обеспечивает объем максимальной подачи при заданном давлении на входе в эжектор и заданной зависимостью объемного

расхода воздуха от давления вакуумного насоса

$$Q_{\text{вх}} = f(P_{\text{вх}}).$$

В процессе совершенствования рассчитываются конструктивные параметры предвключенного эжектора, для выбранного вакуумного насоса объемная подача по откачиваемому воздуху при определенном давлении на входе в эжектор будет максимальной, а также характеристики вакуумного насоса и предвключенного эжектора (рисунк 1.4).

Из всех видов эжекторов, различающихся по типу эжектирующей струи и характера ее истечения, в первой главе рассмотрено состояние использования воздушных и жидкостных стационарных и пульсирующих эжекторов, рабочей средой в которых является жидкость или воздух. Смешивание жидкостей, а также жидкостей с газами рассмотрено в данном случае как дополнительный процесс, расширяющий возможности эжекторов.

Основным достоинством как стационарных, так и пульсирующих эжекторов является простота их конструкции, компактность, отсутствие износа или его незначительные величины, возможность работы с засоренными и агрессивными средами. Газоструйные аппараты, обычно выполняемые одноступенчатыми, работают с широким интервалом коэффициентов эжекции при незначительных перепадах давления как ниже, так и выше атмосферного. При создании более значительного перепадов давления, применяют многоступенчатые газо- и жидкостноструйные аппараты с прямолинейным и вихревым движением рабочего потока [1,8].

Эжектор - это устройство с соплами и переменным по длине проточной части сечением, которая преобразует энергию - а значит, его работа возможна только в составе системы или в сочетании с другими механизмами, способными обеспечивать работу аппарата, необходимой для функционирования энергией.

Системообразующим элементом любой реальной технической системы, независимо от функционального назначения, как известно, является источник или генератор. Это могут быть насосы, компрессоры, вентиляторы или среды, обладающие потенциальной энергией, например, сжатые газы.

Общеизвестно, что в реальных системах всегда существует избыточное количество энергии. В связи с этим практически в любую систему можно без нарушения ее функциональных возможностей подключить эжектор. Его работа будет производиться за счет отмеченного избытка энергии. В настоящее время эта избыточная энергия не всегда используется и теряется безвозвратно.

Применение эжектора в составе любой технической системы сокращает потери энергии в окружающую среду - что, в свою очередь, способствует увеличению суммарного коэффициента полезного действия всей системы в целом.

Таким образом, использование эжекторов может стать фактором реализации программ ресурсосбережения.

Области практического применения эжекторов все время расширяются. Результаты исследований показывают, что наиболее перспективными областями использования эжекторов со стационарным и пульсирующим движением активного потока в ближайшем будущем, могут стать пожаротушение, орошение, водополив (переносные и стационарные системы), вентиляция (приточная и вытяжная), нефтепереработка и трубопроводный транспорт и другие.

Пульсирующие газовые эжекторы, которые на сегодняшний день не получили такого широкого распространения, которое получили стационарные. Они используются для создания вакуума в диапазоне давлений 0,5...100 мм рт.ст. Источником энергии в них является газ, чаще всего воздух повышенного давления (активный поток), который подается через активное сопло [1].

Как правило, эжектор содержит рабочее сопло, приемную камеру, сопло откачиваемой среды, камеру смешения и диффузор.

Для создания пульсирующего движения предусматривается специальное устройство, основанное на прерывании подачи активного потока.

Назначение сопел - подвод напорного и откачиваемого потоков в камеру смешения. Рабочий поток подается через сопла, который находится по оси камеры или по ее периферии. конструктивно более простыми являются эжектора

с центральным подводом активной среды, однако часто периферийный подвод активной среды является необходимым

1.1.1 Вклад отечественных и зарубежных ученых в развитие научных знаний о процессах, проходящих при пониженном давлении среды, в сельском хозяйстве

Вопросы по повышению чистоты и контролю качества промывки молокопроводов доильных установок рассмотрены в работах Карташова Л.П.

Как было отмечено выше, большое число технологических процессов проводятся при пониженном давлении (вакууме). Значительный вклад в развитие научных знаний о процессах, проходящих при пониженном давлении среды, в сельском хозяйстве и промышленности внесли Абрамович Г.Н., Алашкин В.Р., Бородин И.Ф., Волков И.Е., Зиганшин Б.Г., Кирсанов В.В., Коба В.Г., Лойцянский Л.Г., Мельников С.В., Николаев П.И., Некрашевич В.Ф., Плановский А.Н., Рудаков А.И., Седов Л.И., Нафиков И.Р. и др.

Вопросами использования эжекторов занимались: Александров В.Ю., Аркадов Ю.К., Арсеньев В.М., Демиков, К.Е., Зингер Н.М., Калмыков И.И., Лямаев Б.Ф., Палий, В.А., Путилов М.И., Райзман И.А., Рудаков А.И., Соколов Е.Я., Цейтлин А.Б., Шумский К.П. Анализ проблемы показал, что для повышения эффективности процесса необходима значительная интенсификация взаимодействия потоков. Использование нестационарных режимов движения, путем применения пульсирующих и закрученных потоков, а также искусственное снижение температуры их взаимодействия.

Вопросами взаимодействия газовых потоков и теплообмена в них занимались Вукалович М.П., Гарбер Х., Канторович В.Б., Касаткин А.Г., Кафаров В.В., Кутателадзе, С.С., Пилбс Ф., Рамм В.М., Тодес О.М. и др.

Результаты анализа отечественных и зарубежных исследований показали, что в условиях ужесточения требований к энергетической и экономической эффективности, существующие эжектора в составе жидкостно-кольцевых вакуумных насосов, не удовлетворяют современным требованиям

Использование разработанных способов интенсификации процессов позволяет свести к минимуму данный недостаток.

1.2 Конструктивные схемы и особенности работы эжекторов со стационарным и пульсирующим движением активного потока

1.2.1 Конструктивные схемы и особенности работы стационарных эжекторов с устройствами стабилизации режимов их работы

В тех случаях, когда при работе эжекторов поддерживаются режимы, близкие к эффективным значениям, предусматриваются механизмы поддержания подачи аппарата, без снижения их параметров по давлению.

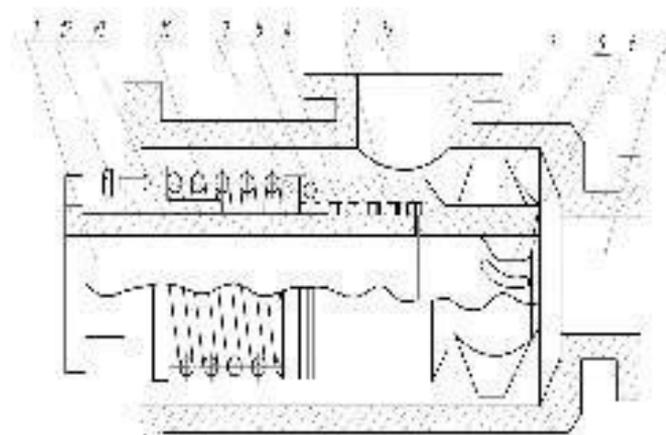
Спруйный аппарат с уравнительным механизмом

На рисунке 1.7 изображен эжектор с иглой, который имеет возможность осевого перемещения за счет пружинены для повышения стабильности работы, надмембранная полость стабилизирующего механизма соединен с камерой смешения, а подмембранная область свсасывающей трубкой.

Игла снабжена приводом, состоящим из уравнительного и силового мембранных механизмов. Подмембранная полость силового мембранного механизма имеет выпускной клапан и связанный с мембраной уравнительного механизма.

Эжектор с автоматическим поддержанием эффективного режима работы

Автоматическое поддержание эффективного режима работы эжектора в этом случае достигается тем, что в эжекторе установлен патрубок подвода активной среды (рисунок 1.8), который соединен с подвижным в окружном направлении соплом, имеющим наклонные лопатки на наружной и внутренней поверхности.



1 - корпус; 2 - камера смешения; 3 - патрубок подвода активной среды; 4 - подвижное сопло; 5, 6 - наклонные лопатки; 7 - резьбовая пара; 8 - подшипник; 9 - скользящая полумуфта; 10 -

штука, 11 – упругий элемент, 12- регулировочный винт, 13 – патрубок подвода пассивной среды

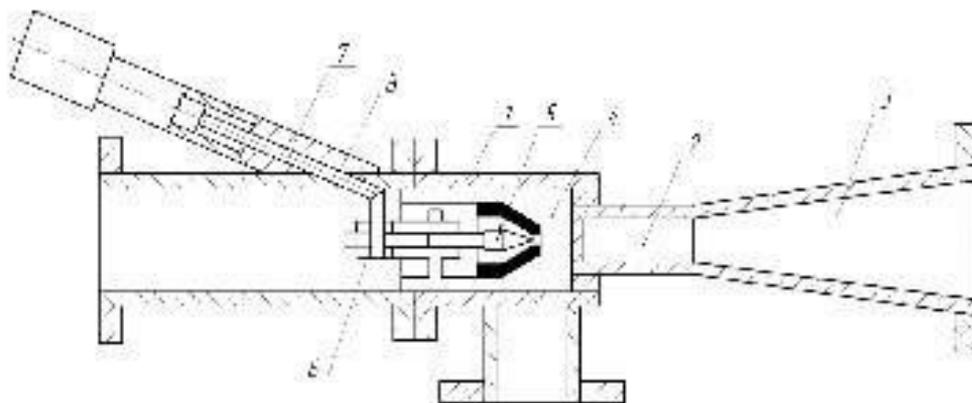
Рисунок 1.8 - Эжектор с автоматическим поддержанием эффективного режима работы

При рассогласованности активной среды с лопастями б, а пассивной среды с лопастями 5 образуются пара противоположных вращающихся момента. Когда вращающихся моменты одинаковы, то сопло неподвижно. При изменении давления в одной из сред, соотношение вращающихся моментов меняется, в результате чего сопло 4 меняет свое положение относительно оси и двигается в осевом направлении.

Струйный аппарат с регулирующей иглой

На рисунке 1.9 приведен струйный аппарат, в котором корпус снабжен патрубком, расположенным под острым углом к его основанию по ходу потока, и в патрубке помещен шток с иглой. Таким исполнением струйного аппарата достигается стабилизация работы аппарата и повышение его КПД.

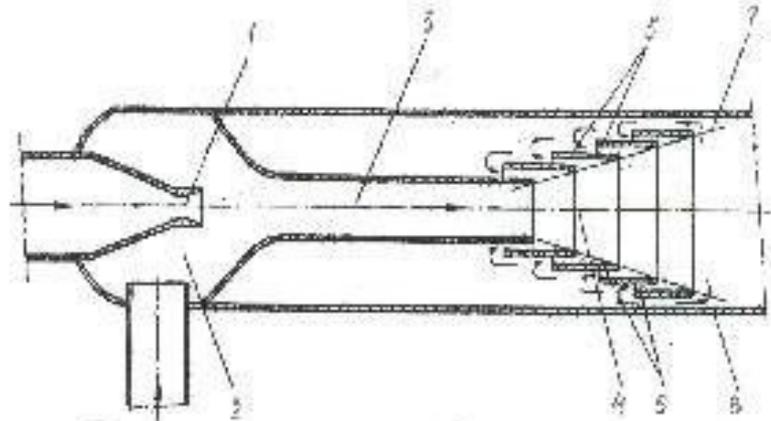
Перемещением иглы 5 в активном сопле 4 при помощи штока 7, соединенного с толкателем б, изменяют режим истечения активного потока и, тем самым, режим работы струйного аппарата.



1 - корпус; 2 - камера смешения, 3 - диффузор, 4 - активное сопло; 5 - игла; 6 - толкатель; 7 - шток; 8 - патрубок

Рисунок 1.9 - Струйный аппарат

Газовый эжектор с коаксиальным диффузором



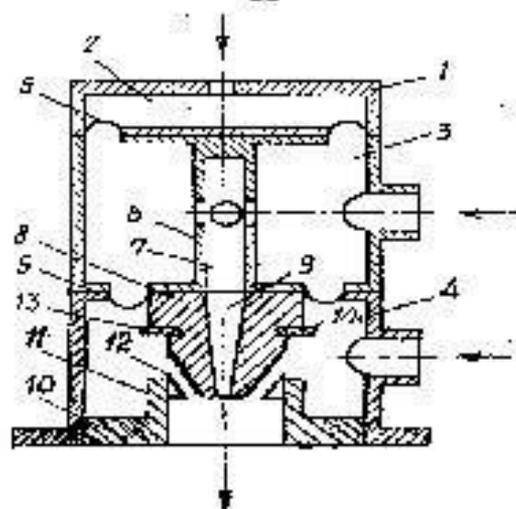
1 - активное сопло; 2 - приемная камера; 3 - камера смешения; 4 - диффузор; 5 - коаксиально расположенный патрубок; 6 - щель; 7 - расширяющийся конус; 8 - напорный трубопровод

Рисунок 1.10 - Газоструйный эжектор с коаксиальным диффузором

Особенностью работы приведенного на рисунке 1.10 схематично изображенного газоструйного эжектора с коаксиальным диффузором является то, что циркуляционные потоки проникают через пространство, образованное трубопроводом 8 и наружной поверхностью последнего патрубка, и распределяются пропорционально перепадам давлений, возникающих в щелях 6 диффузора.

Эжектор с подвижным активным соплом

На изображении 1.11 показан эжектор с подвижным активным соплом. В отмеченном на рисунке струйном аппарате регулировка работы струйного аппарата происходит при изменении давления в управляющей камере 2, от чего приводится к продольному движению штока 6 с сопловым блоком 8. В итоге втулка 11 частично или полностью закрывает вход в сопло 12, что приводит к снижению утечек эжектируемой среды.

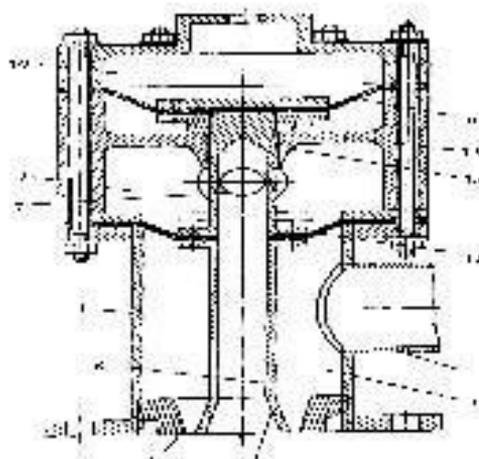


1 - корпус; 2 - управляющая камера; 3 - центральная полость; 4 - выходная камера; 5 - пружина; 6 - шток; 7 - полость; 8 - сопловой блок; 9 - центральное сопло; 10 - опора; 11 - втулка; 12 - наклонные сопла; 13, 14 - стопорные сопла

Рисунок 1.11 - Струйный аппарат с подвижным активным соплом

Эжектор с эластичной мембраной

Повышение эффективности работы данного эжектора достигается автоматическим регулированием подачи пассивной среды. Это достигается тем, что полости разделены эластичной мембраной, а в полости пассивной среды установлена перегородка, имеющая центральное отверстие со стенкой, перекрывающей окно для подвода пассивной среды при перемещении патрубка.



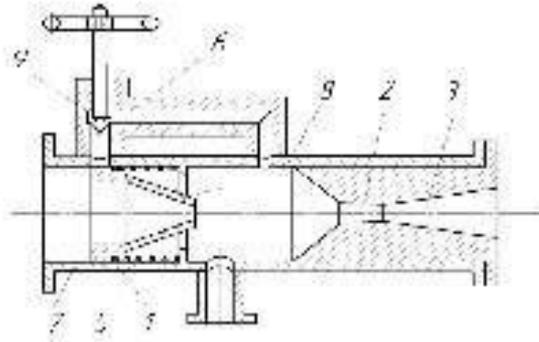
1 - корпус; 2 - патрубок подвода активной среды; 3 - полость активной среды; 4 - пассивной среды; 5 - активное сопло; 6 - патрубок; 7 - окно; 8 - пассивное сопло; 9 - мембрана; 10 - полость верхняя; 11 - мембрана; 12 - перегородка; 13 - отверстие

Рисунок 1.12 - Эжектор с эластичной мембраной

Пульсирующий струйный аппарат с подпружиненным активным соплом

Особенность пульсирующего струйного аппарата, приведенного на рисунке 1.13, который проявляет то, что активное сопло 4 установлено с пружиной относительно корпуса 1 втулкой 5.

Пульсирующая подача активной среды из сопла 4 регулируется путем изменения проходного сечения регулируемого дросселя 9.

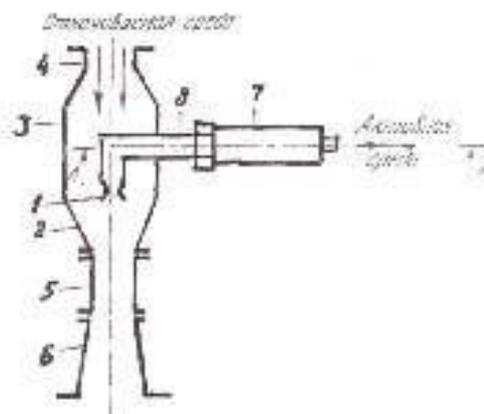


1 - корпус; 2 - камера смешения; 3 - диффузор; 4 - активное сопло; 5 - подпружиненная относительно корпуса 1 втулка; 6 - перепускной канал; 7 - патрубок подвода активной среды; 8 - приемная камера; 9 - регулируемый дроссель

Рисунок 1.13 Струйный насос с подпружиненным активным соплом

Эжектор с прерывистой подачей активного потока с шариковым клапаном

В линии подачи активной среды, перед центральным активным соплом установлен прерывающий механизм. Он состоит из цилиндрической гильзы, в которой выполнены каналы для подвода высоконапорной среды. Внутри гильзы помещены прерывающий поток высоконапорной среды, шарик пружина. Открытие отверстия входного патрубка осуществляется воздействием высоконапорного потока на шарик.



1 - сопло подачи высоконапорной среды; 2 - сопло откачиваемой среды; 3 - приемная камера; 4 - патрубок подачи откачиваемой среды; 5 - камера смешения; 6 - диффузор;

7 - прерывающий механизм; 8 - входной патрубок, 9 - цилиндрическая гильза; 10 - каналы; 11 - шарик; 12 - пружина; 13 - контргайка

Рисунок 1.14 - Пульсирующий эжектор

Запирание входного отверстия производится тем же шариком за счет силового воздействия цилиндрической пружины, упругость которой регулируется установкой гильзы путем наворачивания ее на входной патрубок струйного аппарата.

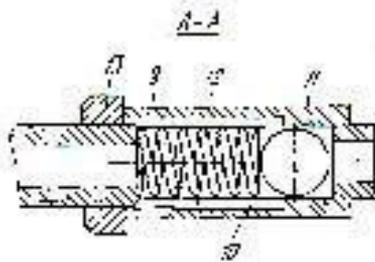


Рисунок 1.14

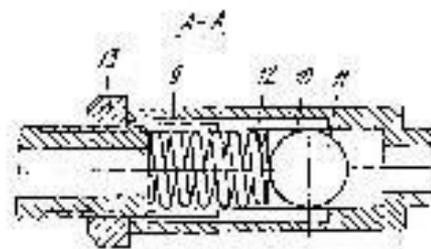
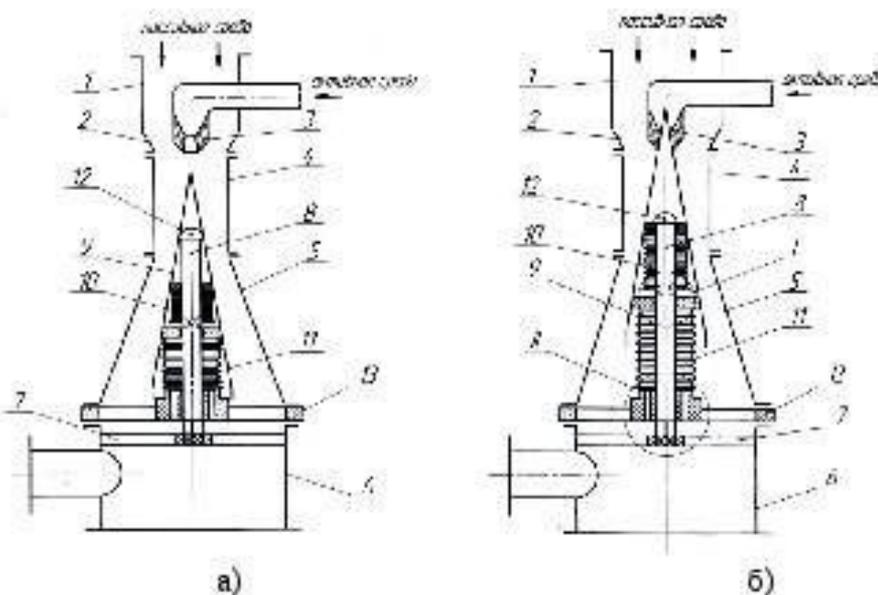


Рисунок 1.15

Прерывающий механизм в момент запирания подачи активной среды (рисунок 1.14), механизм при подаче активной среды (рисунок 1.15).

Эжектор с прерывистой подачей активного потока с сифоном и коническим насадком

На рисунках 1.16 показан пульсатор для смешивания и транспортирования жидкостей и газов [89,134].

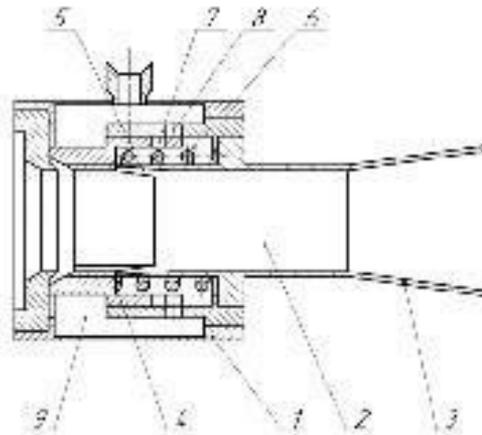


а) - Активное сопло открыто, б) - Активное сопло закрыто

Рисунок 1.16 - Пульсатор для прерывистой подачи активного потока

Прерывисто-пульсирующий эжектор клапанного типа

Повышение эффективности работы показанного на рисунке 1.17 прерывисто-пульсирующий эжектора клапанного типа достигается автоматическим регулированием подачи активной среды.

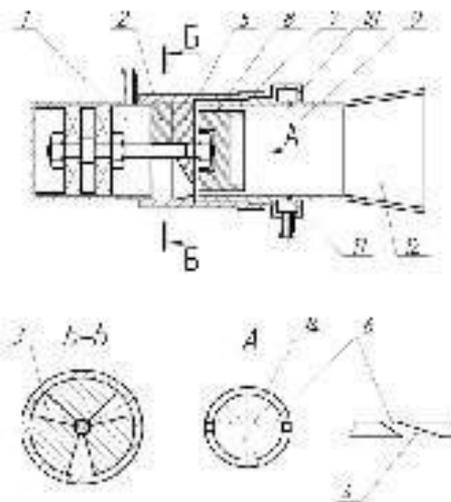


1 - сопло подачи высоконапорной среды, 2 - камера смешения, 3 - диффузор, 4,5-клапана, 6 - полость клапана, 7,8 - каналы

Рисунок 1.17 - Прерывисто-пульсирующий эжектор клапанного типа

Прерывисто-пульсирующий эжектор шторно-щелевого типа

Особенностью прерывисто-пульсирующего эжектора шторно-щелевого типа, показанного на рисунке 1.18 [4], является то, что активная среда из



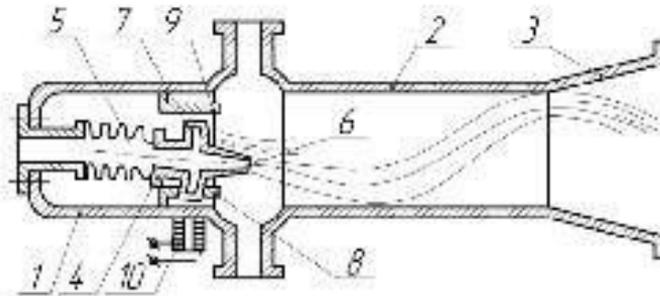
1 - коллектор, 2 - неподвижный диск, 3 - радиальные каналы, 4 - профилированные каналы, 5 - вращающийся диск, 7 - экран, 8 - кольцевой паз, 9 - камера смешения, 10 - коллектор, 11 - каналы, 12 - диффузор, 14 - выпрямитель

Рисунок 1.18 - Прерывисто-пульсирующий эжектор шторно-щелевого типа

коллектора 1 подается через радиальные каналы 3 неподвижного диска 2, профилированные каналы 4 на вращающийся диск 5. Активный поток разгоняется в профилированных каналах 4 диска 5 и приводит его во вращение.

Струйный аппарат с качающимся сопловым блоком

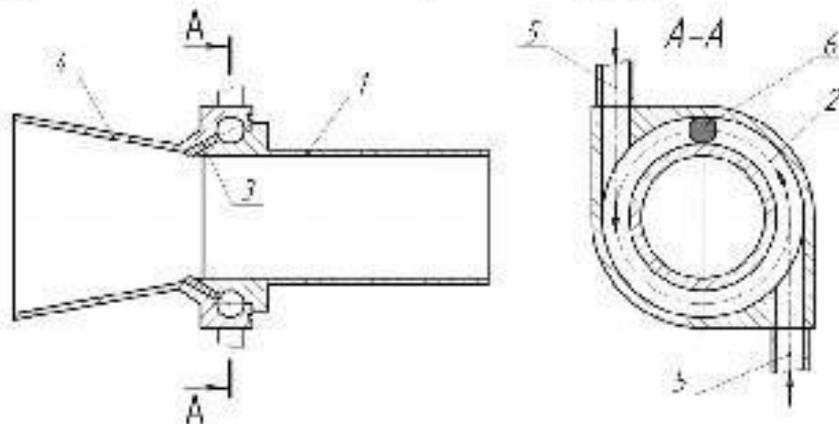
На рисунке 1.19 изображен струйный аппарат с колеблющейся эжектирующей струей, относящийся к струйным пульсирующим аппаратам с регулирующим элементом, совершающим колебательное движение.



1 - корпус; 2 - камера смещения; 3 - выходной диффузор; 4 - сопловый блок; 5 - сиффон; 6 - осевое сопло; 7 и 8 - радиальные сопла; 9 - отверстия планок; 10 - электромагнит
Рисунок 1.19 - Струйный аппарат с качающимся сопловым блоком

1.2.2 Эжектора с регулирующим элементом, совершающим вращательное движение (вращательные эжекторы)

В линии подачи активной среды, перед центральным активным соплом установлен прерывающий механизм (рисунок 1.20) [4].



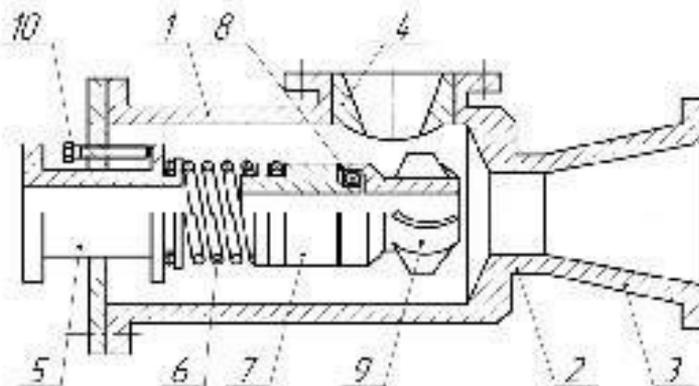
1 - сопло пассивной среды; 2 - канал для прерывистой подачи активной среды; 3 - канал для подачи прерывистой подачи активной среды; 4 - диффузор; 5 - патрубок для подачи высоконапорной среды; 6 - шарик для прерывистой подачи активной среды

Рисунок 1.20 - Струйные пульсирующие аппараты с регулирующим элементом, совершающим вращательное движение

Где происходит подача активной высоконапорной среды в канал 5, далее попадающий канал 2. В этом канале происходит периодический закрытие и открытие подачи активной среды с помощью шарика, который вращается за счет давления потока.

На рисунке 1.21 изображен струйный аппарат с регулирующим элементом, совершающим вращательное движение.

Особенности конструкции является наличие подвижного узла 7, подшипника 8 и соплового аппарата 9, благодаря которым осуществляется вращение соплового аппарата 9 вокруг продольной оси и колебательное движение его за счет пружины 6.

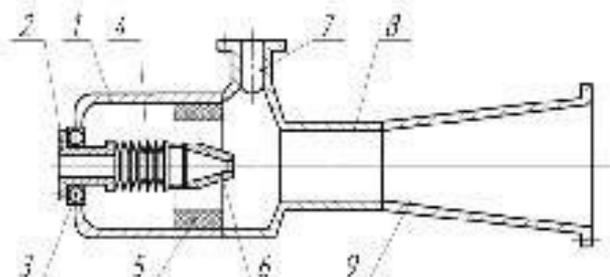


1-корпус; 2-камера смешивания; 3- диффузор; 4-напорное сопло; 5-втулка; 6-пружина; 7- подвижный узел; 8-подшипник; 9- сопловой аппарат.

Рисунок 1.22 - Пульсирующий струйный аппарат с регулирующим элементом, совершающим вращательное движение

1.23 Эжекторы с регулирующим вращательно-колебательным элементом, (комбинированные эжекторы)

Особенностью аппаратов с регулирующим элементом, совершающий вращательно-колебательное движение - является повышение эффективности смешения и эксплуатационной надежности. Цель достигается тем, что - либо сопловой блок, либо другой элемент, имеет с камерой смешения связь, например, с помощью сиффона, и включает в себя осевое и радиальные движение сопла. вращательное движение осуществляется при помощи статора 5, колебательное движение за счет сиффона [4].



1-корпус; 2-активное сопло; 3-подшипник; 4-сильфон; 5-статор; 6-сопло; 7-пассивное сопло; 8-замера смешивания; 9-диффузор

Рисунок 1.23 - Комбинированный пульсирующий струйный аппарат

1.3 Основные расчетные зависимости и анализ исследований эжекторов со стационарным и пульсирующим движением активного потока

1.3.1 Некоторые сведения по газовой динамике

При рассмотрении теории воздушных эжекторов необходим минимум сведений по газовой динамике и по газодинамическим функциям. [18,19].

Критическая скорость газового потока в этом случае равна:

$$a_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT^*} \quad (1.1)$$

Приведенная (относительная) скорость $\lambda = \frac{u}{a_{кр}}$ (1.2)

Газодинамическая функция давления,

$$\pi(\lambda) = \frac{p}{p^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (1.3)$$

Газодинамическая функция расхода

$$q(\lambda) = \frac{F}{F_{кр}} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda \quad (1.4)$$

Газодинамическая функция импульса,

$$z(\lambda) = \frac{1}{2} \left(\lambda + \frac{1}{\lambda}\right) \quad (1.5)$$

В таблице 1.3 приведены соотношения отмеченных и некоторых других газодинамических функций.

Массовый расход газа $M = m q(\lambda) \frac{p^* F}{\sqrt{T^*}}$, (1.6)

где число, $m = \sqrt{\left(\frac{2}{k-1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{k}{R}}$, (1.7)

для воздуха при газовой постоянной, равной $R = 287,4 \text{ Дж/кг}^\circ\text{С}$, $m = 0,4037$.

Кинематическое соотношение в прямом скачке уплотнений

$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 = 1. \quad (1.8)$$

Исследованиям работы всех видов эжекторов посвящено большое число работ отечественных и зарубежных ученых [2, 4, 5, 6].

Наиболее полно работы по расчету параметров и характеристик эжекторов со стационарным и пульсирующим движением активного потока представлены в трудах Г.Н. Абрамовича [1] и Е.Я. Соколова и Н.М. Зингера.

Работа Е.Я. Соколова и Н.М. Зингера посвящена исследованию основных типов струйных аппаратов. В ней рассмотрено развитие теории, предложена их классификация. Согласно принятой авторами классификации все струйные аппараты подразделены в зависимости от агрегатного состояния смешиваемых потоков на следующие группы:

- аппараты с одинаковым агрегатным состоянием потоков для смешивания,
- аппараты, где агрегатное состояние активного и пассивного потока находятся в различных состояниях,
- аппараты с меняющимися агрегатными состояниями среды

Для аппаратов с неизменными геометрическими размерами рациональные условия работы имеют место только при расчетных режимах. При нерасчетных режимах работы струйных аппаратов степень сжатия $\varepsilon = p/p_n$ и коэффициент эжекции u могут существенно отличаться от расчетных режимов.

Достижимый коэффициент эжекции определен по формуле:

$$u = \frac{K_1 \frac{a_{p^*}}{a_{c^*}} \lambda_{p_1} - K_3 \lambda_{c_1}}{K_4 \lambda_{c_1} - K_2 \frac{a_{n_1}}{a_{c^*}} \lambda_{n_1}}, \quad (1.9)$$

где K_1 - скоростной коэффициент активного потока,

K_2 - скоростной коэффициент пассивного потока,

$$K_1 = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3, \quad (1.10)$$

$$K_2 = \varphi_2 \varphi_3 \varphi_4, \quad (1.11)$$

$$K_3 = 1 + \varphi_1 \frac{a_{p^*} p_c}{a_{c^*} p_p} \frac{(\Pi_{c_1} - p_n)}{k_p \Pi_{p^*} \lambda_{c_1} q(\lambda_{p_1})}, \quad (1.12)$$

$$K_4 = 1 + \varphi_3 \frac{a_{n^*} p_c}{a_{c^*} p_n} \frac{(\Pi_{c_1} - \Pi_{c_2})}{k_n \Pi_{n^*} \lambda_{c_1} q(\lambda_{p_{n_1}})}, \quad (1.13)$$

Здесь $\Pi_{c_1} = \frac{p_{n_1}}{p_c} = \Pi_{n_1} = \frac{p_n}{p_c}$.

Так как $\frac{a_{c^*}}{a_{p^*}} = \frac{1+u\sqrt{\theta}}{1+u}$ и $\frac{a_{c^*}}{a_{n^*}} = \frac{1+u\sqrt{\theta}}{(1+u)\sqrt{\theta}}$,

то $u\sqrt{\theta} = \frac{K_1\lambda_{p_1} - K_3\lambda_{c_1}}{K_1\lambda_{c_1} - K_2\lambda_{n_1}}$, (1.14)

$$K_3 = 1 + \varphi_3 \frac{a_{p^*} p_c}{a_{c^*} p_p} \frac{\left(\Pi_{c_1} - \frac{p_n}{p_c} \right)}{k_p \Pi_{p^*} \lambda_{c_1} q(\lambda_{p_1})}, \quad (1.15)$$

$$K_4 = 1 + \varphi_3 \frac{a_{n^*} p_c}{a_{c^*} p_n} \frac{(\Pi_{c_1} - \Pi_{c_1})}{k_n \Pi_{n^*} \lambda_{c_1} q(\lambda_{n_1})}, \quad (1.16)$$

Уравнение характеристики эжекторов при $k_p = k_n$ и $R_p = R_n$ определено следующим уравнением

$$\frac{p_c}{p_n} = \frac{1}{\Pi_{c_1}} \left\{ \Pi_{p^*} \frac{p_p}{p_n} \frac{f_{p1}}{f_3} + \Pi_{n^*} \frac{f_{n2}}{f_3} + \frac{k_p \Pi_{p^*}}{\varphi_3} \times \frac{f_{p^*}}{f_3} \frac{p_p}{p_n} \left[\begin{array}{l} K_1 \lambda_{p_1} + K_2 u \times \\ \times \sqrt{\theta} \lambda_{n_2} - \\ - (1+u) \sqrt{\theta} \lambda_{c_3} \end{array} \right] \right\} \quad (1.17)$$

В работах Г.Н. Абрамовича [1] выведены уравнения сохранения, используемые нами ниже также и для пульсирующего движения. Они являются базовыми при определении параметров любых эжекторов. Это уравнения законов сохранения массы, энергии и количества движения.

Закон сохранения массы (уравнение неразрывности).

$$M_3 = M_1 + M_2 \quad (1.18)$$

Закон сохранения энергии.

$$M_3 \left(c_{p3} T_3 + \frac{V_3^2}{2} \right) = M_1 \left(c_{p1} T_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) + M_2 \left(c_{p2} T_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) + Q, \quad (1.19)$$

где Q - суммарное тепло, которое подводится к воздуху в КС через стенки, путем теплоотдачи.

Закон сохранения импульса (уравнение количества движения).

Для эжектора с цилиндрической камерой смешения.

$$M_3 V_3 - M_1 V_1 - M_2 V_2 = p_1 F_1 + p_2 F_2 - p_3 F_3,$$

$$\text{или} \quad M_3 V_3 + p_3 F_3 = M_1 V_1 + p_1 F_1 + M_2 V_2 + p_2 F_2. \quad (1.20)$$

Процессы, протекающие в газоструйных аппаратах, были рассмотрены также Ю.Н. Васильевым, Д.Х. Зайденштейном, П.С. Матвиенко и В.Н. Стабниковым, В.К. Щукиным и И.И. Калмыковым и др [1].

К исследованию характеристик эжекторов можно отнести работы Г.Н. Абрамовича [1], Е.Я. Соколова и Н.М. Зингера.

В работе Васильева Ю.Н. [1] предполагается, что сумма полных импульсов на входе в камеру смешения и в сечении запирания равны между собой.

$$M_1 \alpha_{\text{пр}} [\varepsilon(\lambda_1) - \varepsilon(\lambda_2)] = M_2 \alpha_{\text{пр}} [\varepsilon(\lambda_2) - \varepsilon(\lambda_3)]. \quad (1.21)$$

В работах М.Е. Дейча и А.Е. Зарянкина [1] приведены исследования течения газовых потоков в элементах эжектора: соплах, камере смешения и диффузоре. Неравномерность скоростного поля в конце камеры смешения предложено учитывать коэффициентом скоростных потерь $\phi_{\text{кс}}$. В этом случае значение газодинамической функции импульса определится как:

$$\varepsilon(\lambda_3) = \phi_{\text{кс}} \cdot \frac{1}{2} \left(\lambda_3 + \frac{1}{\lambda_3} \right). \quad (1.22)$$

При равномерном скоростном поле коэффициентом скоростных потерь $\phi_{\text{кс}} = 1$, при неравномерном $\phi_{\text{кс}} > 1$.

Коэффициент потерь в диффузоре определялся степенью расширения β_3 (коэффициент потерь в этом случае относится к выходной скорости V_4):

$$\xi_{\text{с.д}} = \left(\frac{\rho_3}{\rho_4} \right)^2 \frac{1}{\beta_3^2}, \quad (1.23)$$

где ρ_3/ρ_4 - отношение плотностей на входе и выходе диффузора.

В работе П.С. Матвиенко и В.Н. Стабниковым [1] большее внимание уделено вопросам применения эжекторов со стационарным и пульсирующим движением активного потока в технологических установках.

Профиль проточной части входа в аппарат принят из условия обеспечения равномерности эжектируемого потока в камере смешения при наименьших затратах энергии при этом. Наиболее рациональным профилем входа, по мнению авторов, является уравнение лемнискаты.

Выходные размеры сечения сопел выявлены в зависимости от скорости потока:

$$V_{\text{вых}} = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta_c}} \sqrt{\frac{2p_i}{\rho_i}}, \quad (1.24)$$

$$d_c = 2 \sqrt{\frac{W_i \sqrt{1+\zeta_c}}{\pi \sqrt{\frac{2p_i}{\rho_i}}}} = 2 \sqrt{\frac{V_i}{\pi \varphi_c \sqrt{\frac{2p_i}{\rho_i}}}}, \quad (1.25)$$

где W_i - объемный секундный расход в i -м сечении.

В работе Б.Ф. Лямаева [1] приведены результаты исследований гидроструйные аппаратов, в которых рабочей жидкостью является вода, а перекачиваемыми средами - жидкостная (гидроструйные насосы), дисперсная среда (аппараты для гидротранспорта) и газовая (гидроструйные вентиляторы и компрессоры).

В.К.Щукиным и И.И. Калмыковым И. [1] исследованы газовые эжекторы при перепаде давления в соплах $\Pi \geq 10$ и степени сжатия эжектора $\varepsilon \geq 2,5$. Авторами аппарат назван струйным компрессором

Связь выходного сечения F_1 и приведенной скорости истечения λ_1 определяется формулой:

$$\frac{F_1}{F_{\text{эп1}}} = \frac{1}{\lambda_1} \left[\frac{\frac{2}{k+1}}{1 - \frac{k-1}{k+2} \lambda_1^2} \right]^{\frac{1}{k-1}} = \frac{1}{q(\lambda_1)}, \quad (1.26)$$

где σ - коэффициент восстановления давления в элементе СК.

Для эжектора с конфузорной камерой смешения, у которого сечение выхода активного сопла совпадает с входным сечением камеры, уравнение имеет вид

$$z(\lambda_1) + u\sqrt{\theta}z(\lambda_2) = (u\sqrt{\theta} + 1) \times \left[z(\lambda_3) + \frac{k}{k+1} \xi \frac{l}{d} \lambda_3 \right] + N, \quad (1.27)$$

$$\text{где } N = \frac{2k}{k+1} \cdot \frac{1}{M_1 \cdot g \cdot a_{\text{эп1}}^3} \int p dF. \quad (1.28)$$

Полученные выше вычисленные уравнения дают возможность определить геометрические размеры аппаратов, таких как: продольные размеры, взаимоположение сопел, их численность, а также воздействие технологических и

монтажных факторов на основные показатели функционирования струйных аппаратов следует определить в основном экспериментальными путями.

Выводы по разделу 1

1. Проведен анализ литературных источников состояния теоретических и экспериментальных исследований эжекторных ступеней жидкостно-кольцевых вакуумных насосов, который выявил неразработанные и слабо разработанные вопросы проектирования и доводки этих агрегатов и их элементов.

2. Проведен анализ исследований в области адекватного моделирования струйного оборудования различного назначения для животноводства и сельскохозяйственного производства в целом. Разработаны классификационные схемы и приведен морфологический анализ структуры стационарных и пульсирующих струйных аппаратов, которые позволили определить перспективные конструкции струйного оборудования и струйных технологий.

3. Разработана классификационная схема и морфологический анализ структуры стационарных и пульсирующих струйных аппаратов (эжекторов), являющимися предвключенной ступенью жидкостнокольцевых вакуумных насосов (ЖКВН).

4. Разработана классификация единый для всех стационарных и пульсирующих струйных аппаратов, играющая важнейшую роль в оценки как создаваемых вновь, так и существующих образцов предвключенных эжекторов ЖКВН.

5. Поставлены и обоснованы цель и задачи исследований.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭЖЕКТОРА ВАКУУМНОГО АГРЕГАТА С ПУЛЬСИРУЮЩИМ И СТАЦИОНАРНЫМ ДВИЖЕНИЕМ АКТИВНОГО ПОТОКА

2.1. Основные положения работы эжекторов с пульсирующим движением активного потока

Применение пульсирующих эжекторов позволяет существенно снизить затраты энергии на проведение технологических процессов, при тех же продольных и поперечных размерах, что и у стационарных аппаратов [3,5,6].

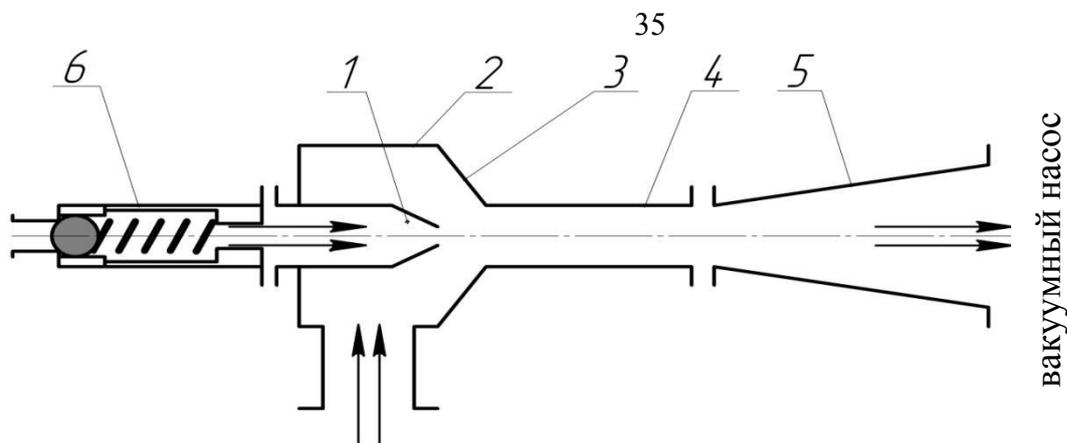
Использование активного нестационарного потока способствует более эффективному обмену энергией между активной и пассивной средой. С физической точки зрения эффективность воздействия на пассивную среду можно объяснить следующим:

- возможностью передачи импульса энергии с помощью волн давления (последовательное присоединение дополнительных масс);
- возможностью организации рабочего процесса не только с последовательным, но и параллельным присоединением дополнительных масс;
- возрастанием интенсивности смешения потоков.

Анализ эффективности эжекторной ступени жидкостнокольцевого вакуумного насоса с активным нестационарным (пульсирующим) потоком позволяет констатировать увеличение коэффициента эжекции, одного из основных показателей работы эжекторов, наряду с ростом КПД. По данным, приведенным в работах, по сравнению со стационарным потоком при прочих равных условиях, коэффициента эжекции увеличивается в 1,5 - 2 раза (по некоторым источникам до 10 раз).

Как и стационарных аппаратах, общепринято работу пульсирующих эжекторов рассматривать по одномерной адиабатической модели течения газа.

На рисунке 2.1 приведена схема эжектора с суживающимся соплом подачи рабочей среды с клапанным прерывателем активного потока.



1 - рабочее (активное) сопло; 2 - приемная камера; 3 - сопло откачиваемой среды (пассивное) сопло; 4 - камера смешения; 5 - диффузор, 6 - устройство создания пульсации

Рисунок 2.1 - Принципиальная схема дозвукового эжектора с шариковым устройством создания пульсирующего движения активного потока

Поток высоконапорной активной среды через входной патрубок и прерывающий механизм эжектора поступает в сопло подачи высоконапорной среды. Сопло выполнено суживающейся формы для жидкой и газовой дозвуковой среды, а также суживающейся - расширяющейся (сопло Лавалья), для газообразной. Специальная форма сопла приводит к значительному ускорению потока и снижению давления в приемной камере. Под действием перепада давления на выходе из активного сопла и давления в пассивном сопле и откачиваемом патрубке, откачиваемая среда поступает в низконапорное сопло. Далее оба потока поступают в камеру смешения, где происходит выравнивание скоростей и давлений потоков, и смесь поступает в диффузор, в котором снижается скорость потока и повышается его давление.

Камера смешения может быть цилиндрической и конической (конфузорной). В некоторых случаях, с целью упрощения изготовления аппарата, коническая камера имеет небольшой цилиндрический участок на выходе (горло), длина которого составляет 2 - 3 диаметра камеры на ее входе (рисунок 2.2).

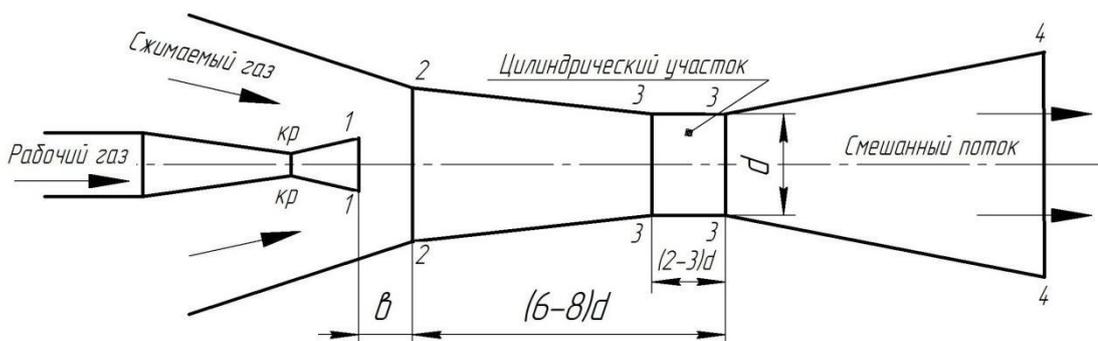


Рисунок 2.2 - Расчетная схема эжектора с конической камерой смешения и цилиндрическим горлом (устройство пульсации на рисунке 2.2 не показано)

Сверхзвуковые перепады давлений, возникающие лишь в газах, и реализуются в соплах Лавала. Как правило, расчетная схема принимается из условия того, что выходные сечения активного и пассивного сопел и входное сечение камеры смешения совпадают (рисунок 2.3...2.4). Проведенные нами исследования и результаты работ Г.Н. Абрамовича [1], Ю.К. Аркадова, [4], У.Г. Пирумова, Е.М. Соколова и Н.М. Зингера, показали, что расположение активного сопла на некотором расстоянии от входа в камеру смешения увеличивает эффективность работы эжектора.

В сверхзвуковом потоке уменьшение площади поперечного сечения приводит к снижению сверхзвуковой скорости и, соответственно, потерь на трение. Расчеты и эксперименты показывают, что эффективность сверхзвуковых эжекторов с конической сужающейся камерой на 10 - 15 % больше, по сравнению с цилиндрической. В них на движущийся поток действует сила реакции стенок R , которая учитывается в основном уравнении эжекции.

Расчетная схема такого аппарата представлена на рисунке 2.3.

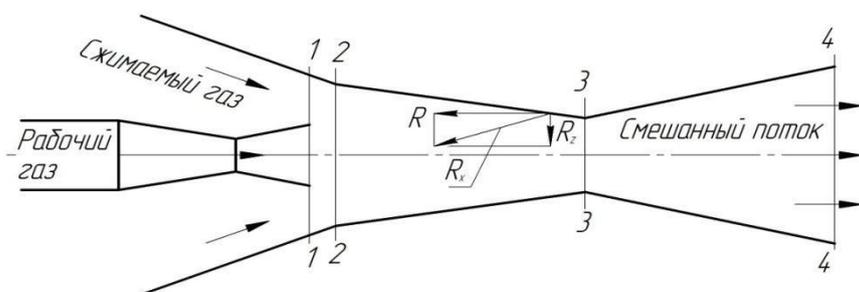


Рисунок 2.3 - Расчетная схема эжектора с конической камерой смешения (устройство создания пульсации на рисунке 2.3 не показано)

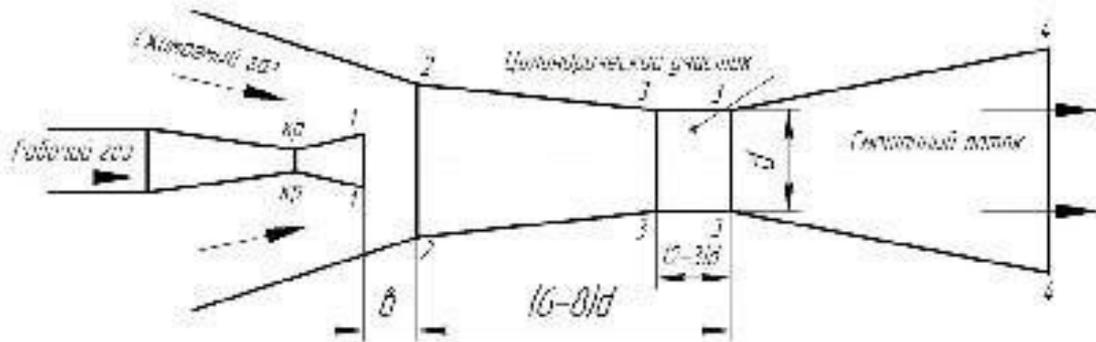


Рисунок 2.2 - Расчетная схема эжектора с конической камерой смешения и цилиндрическим горлом (устройство пульсации на рисунке 2.2 не показано)

Сверхзвуковые перепады давлений, возникающие лишь в газах, и реализуются в соплах Лавала. Как правило, расчетная схема принимается из условия того, что выходные сечения активного и пассивного сопел и входное сечение камеры смешения совпадают (рисунок 2.3...2.4). Проведенные нами исследования и результаты работ Г.Н. Абрамовича [1], Ю.К. Аркадова, [4], У.Г. Пирумова, Е.М. Соколова и Н.М. Зингера, показали, что расположение активного сопла на некотором расстоянии от входа в камеру смешения увеличивает эффективность работы эжектора.

В сверхзвуковом потоке уменьшение площади поперечного сечения приводит к снижению сверхзвуковой скорости и, соответственно, потерь на трение. Расчеты и эксперименты показывают, что эффективность сверхзвуковых эжекторов с конической сужающейся камерой на 10 - 15 % больше, по сравнению с цилиндрической. В них на движущийся поток действует сила реакции стенок R , которая учитывается в основном уравнении эжекции.

Расчетная схема такого аппарата представлена на рисунке 2.3.

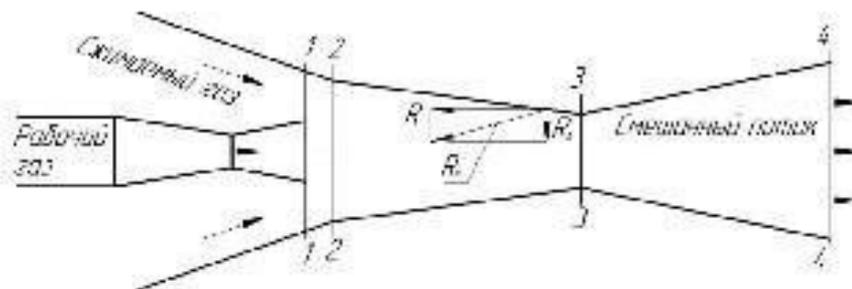


Рисунок 2.3 - Расчетная схема эжектора с конической камерой смешения (устройство создания пульсации на рисунке 2.3 не показано)

сечении запираания поток рабочего воздуха имеет сверхзвуковую скорость, а поток снимаемого - звуковую скорость. Поэтому в камере смешения, за сечением запираания, в процессе смешения скорость смешанного потока сверхзвуковая, которая может быть переведена в дозвуковую в прямом скачке уплотнения.

2.2 Теория движения воздушного потока в камере смешения эжекторе вакуумного агрегата с пульсирующим движением активного потока

Рассмотрим расчет потоков в эжекторе, как расчет потока в канале с постоянным поперечным сечением (эжектор с цилиндрической камерой смешения) и плавным изменением его поперечного сечения по длине (эжектор с конической камерой смешения), а также постоянным по времени, основанный на одномерной адиабатической модели течения. Эта модель учитывает потери количества движения на трение (путевые потери) и потери давления в областях изменения сечения и поворота потока (если они присутствуют) - местные потери.

В общем случае одномерные нестационарные уравнения газовой динамики включают уравнения расхода-неразрывности (2.2), сохранения импульса (2.3) и энергии (2.4). [18]

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho S) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho VS) = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho VS) + \frac{\partial}{\partial x}[S(\rho V^2 + p)] = -\frac{\partial}{\partial x} I_{\text{comp}} + p \frac{\partial S}{\partial x} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left[\rho S \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho VS \left(e + \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} \right) \right] = 0 \quad (2.4)$$

где τ – время (с),

x – продольная координата,

ρ – плотность воздуха ($\text{кг}/\text{м}^3$),

p – давление (Па),

V – скорость потока ($\text{м}/\text{с}$),

S – площадь поперечного сечения канала (м^2).

Уравнения расхода-неразрывности является математическим выражением закона сохранения массы и для технических устройств записывается как равенство расхода жидкости (воздуха) через два произвольных сечения.

Потери количества движения на трение и местные потери $I_{\text{сomp}}$ на участке Δx определяются по формуле [17]

$$I_{\text{сomp}} = \frac{\rho V^2}{2} \left(\lambda \frac{\Delta x}{d} + \xi_{\text{м}} \right) S, \quad (2.5)$$

где λ - коэффициент сопротивления трения,

$\xi_{\text{м}}$ - местное сопротивление.

Для определения коэффициентов сопротивления трения можно использовать их квазистационарные аналоги, в частности, для коэффициента сопротивления трения - соотношение Блазиуса $\lambda = 0,3164/\text{Re}^{0,25}$,

А.Д. Альтшуля $\lambda = 0,11 \left(\frac{\xi}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}$ или Б.Л. Шифринсона $\lambda = 0,11 \left(\frac{\xi}{d} \right)^{0,25}$ в

зависимости от типа течения (числа Рейнольдса) и шероховатости канала [17, 26].

Еще одним уравнением, замыкающим систему, является уравнение состояния идеального газа

$$e = e(p, \rho) \quad (2.6)$$

Изменение по времени статического давления $p(t)$ и площади проходного сечения $S(t)$, регулирование расхода или давления обычно осуществляется путем изменения проходного сечения. Предусматривается задание давления и площади проходного сечения изменением по гармоническому закону (2.7, 2.8). При гармоническом законе задаются амплитуда, частота и фазовый угол, а изменение площади и давления на границе определяется как

$$p = p_{\text{ср}} + A_p \sin(2\pi f t + \varphi_0) \quad (2.7)$$

$$S = S_{\text{ср}} + A_s \sin(2\pi f t + \varphi_0) \quad (2.8)$$

где $p_{\text{ср}}$ $S_{\text{ср}}$ - средние значения давления p и площади S ,

A_p, A_s - амплитуды изменения давления p (Па) площади S (m^2), с частотой f (с^{-1}) и начальной фазой φ_0 (Гц).

Уравнение (2.7) и (2.8) позволяют провести расчет пульсирующих потоков с регулирующим элементом, в виде подпружиненного шарика, с сифонным клапаном и с регулирующим элементом, совершающим колебательное движение эксцентриковой качающейся пластиной. Нами использовано уравнение (2.7), дающее ускоренное и уточненное решение.

Необходимо учесть, что в начальный момент времени ($t = 0$) также задаются постоянные значения p и v - нулевая скорость потока $V = 0$.

2.3 Теоретические зависимости течения воздуха в эжекторе

Основное уравнение эжекции (2.15) для эжекторов с конфузорной камерой смешения имеет вид

$$z(\lambda_3) \sqrt{(n+1)(1+n\theta+\vartheta)} = z(\lambda_2) + n\sqrt{\theta} z(\lambda_1) + \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \frac{R}{p_1^* S_1 q(\lambda_1)}. \quad (2.18)$$

Нами принято распределение давления такое же, как в работе [1].

$$p_{cp} = \frac{p_2 + p_3}{2}. \quad (2.19)$$

Действительное распределение давления вдоль камеры может отличаться от p_{cp} . Нами было проведено определение действительного давления вдоль камеры смешения. Превышение действительного давления по сравнению с теоретическим составило 5-10 %, на такую же величину повышается подача эжектора. Общее повышение подачи аппарата достигает 15-20%, что учтено дополнительным коэффициентом $\beta_{к.с.}$ в расчетных формулах.

В общем случае подача вакуумного агрегата определяется по формуле:

$$Q = \frac{60 \cdot V_{в.}}{t} \cdot \frac{B}{p_1}. \quad (2.28)$$

где B - атмосферное давление, Па.

После подставления p_{Σ} в формулу (2.28) математическая модель определения теоретической подачи вакуумного агрегата примет вид

$$Q_{\tau} = \frac{60 \cdot V_{\kappa}}{t} \cdot \frac{B}{\frac{p_3^*}{\sqrt{(u+1)(1+u\theta+g)} \frac{q(\lambda_1)}{1+1/\alpha}} + A_p \sin(2\pi f\tau + \phi_0)} \quad (2.29)$$

В общем случае мощность вакуумного агрегата определяется по формуле:

$$N_{\tau} = \frac{M}{\rho} \cdot p_{\Sigma} \quad (2.30)$$

где M – массовая подача, $кг/с$; ρ – плотность воздуха, $кг/м^3$, p_{Σ} – суммарная мощность, $Па$

Зависимость для определения теоретической мощности вакуумного агрегата примет вид

$$N_{\tau} = \frac{M}{\rho} \cdot \frac{p_3^*}{\frac{\sqrt{(u+1)(1+u\theta+g)} \frac{q(\lambda_1)}{1+1/\alpha}}{q(\lambda_3)} + A_p \sin(2\pi f\tau + \phi_0)} \quad (2.31)$$

С помощью уравнений 2,29 и 2,31 были выполнены численные расчеты и построены графические зависимости $Q=f(p_{acc})$ и $N=f(p_{acc})$, некоторые результаты

представлены на рисунках 2.9 и 2.10.

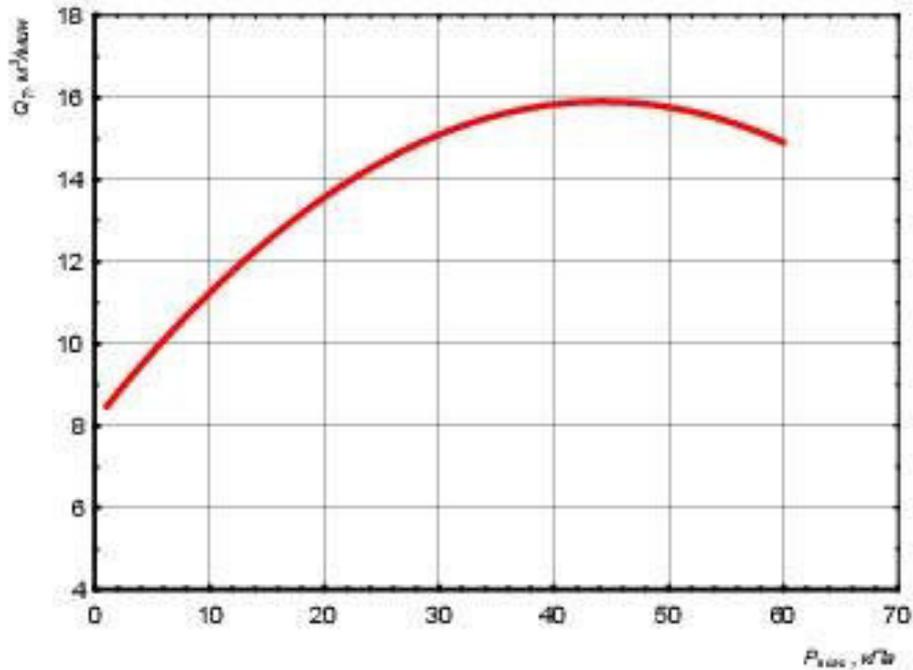


Рисунок 2.9 – Зависимость теоретической подачи Q_T насоса от давления

Исходя из рисунка 2.9, можно сделать вывод, что для экспериментального водокольцевого вакуумного насоса при использовании предвключенного эжектора с прерывистой подачи активной среды давление меняется по параболической зависимости.

При использовании пульсатора в эжекторе для прерывистой подачи активной среды клапанного типа с металлическим шариком приводит к снижению рабочего давления водокольцевого вакуумного насоса.

На рисунке 2.10 представлена зависимость теоретической мощности от давления $N_T = f(P)$

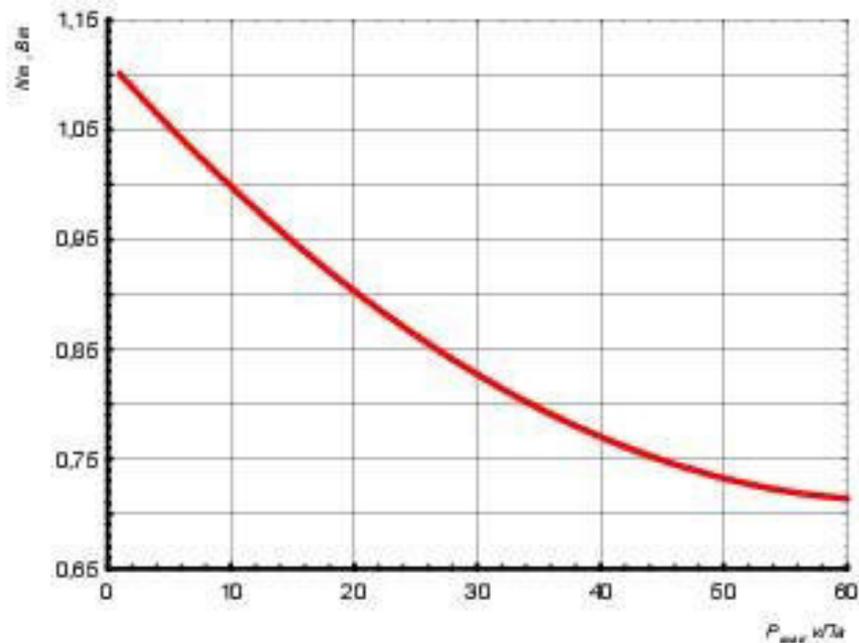


Рисунок 2.10 – Зависимость теоретической мощности N_t насоса от давления

Исходя из рисунка 2.10, можно сделать вывод, что для экспериментального водокольцевого вакуумного насоса при использовании предвключенного эжектора потребная мощность увеличивается по параболической зависимости. При использовании в эжекторе пульсатора для прерывистой подачи активной среды мощность увеличивается незначительно.

Выводы по разделу 2

1 Определены расчетные параметры и рабочие характеристики эжекторных ступеней в составе жидкостно-кольцевых вакуумных насосов.

2 Представлена теория взаимодействия газообразной среды с рабочими элементами эжекторов.

3 На основании заложенных представлений о физических свойствах воздушных потоков представлены:

- теоретические зависимости определяющие параметры скорости и давления газообразных сред в эжекторе;

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОКОЛЬЦЕВОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

3.1 Проведение экспериментальных исследований эжектора вакуумного агрегата с пульсирующим и стационарным движением активного потока

Выдвинутые в разделе 2 теоретические положения, соответствие расчетных параметров и характеристик разработанных эжекторов вакуумного агрегата с пульсирующим и стационарным движением активного потока, а также установление адекватности разработанных математических моделей реальным процессам экспериментальным значениям, проверялось на натуральных образцах [5,19]. Анализ литературных источников и теоретические исследования эжекторов вакуумного агрегата с пульсирующим движением активного потока позволили выявить основные факторы, которые влияют на эффективность его работы.

Объектами экспериментальных исследований явились эжектора с пульсирующим и стационарным движением активного потока. Процессы получения вакуума рассчитывались с использованием разработанных в Казанском ГАУ методов оптимизации. Комплексное исследование разработанных эжекторов было осуществлено в производственных условиях [5] (раздел 4), там же приведены результаты производственных опытов и их анализ.

Задачей исследований являлись определение и обоснование основных параметров эжектора вакуумного агрегата, а также опытное подтверждение достоверности результатов исследований.

В соответствии с поставленной задачей программа экспериментальных исследований эжектора вакуумного агрегата с пульсирующим движением активного потока предусматривает определение следующих характеристик:

- установление влияния конструктивных параметров эжектора на основные показатели вакуумного агрегата.
- определение энергетической и технико-экономической оценки эффективности работы эжектора вакуумного агрегата с пульсирующим

движением активного воздушного потока.

- проведение экспериментальных исследований в лабораторных и производственных условиях.

Эксперименты по совершенствованию заключались в проверке параметров в экстремальных и близлежащих к ним точках. Экспериментальные исследования предусматривали также проверку улучшения полученных характеристик.

Основной задачей экспериментов было определение наиболее эффективных показателей работы эжекторов, таких как, степень повышения давления « ε » (p_3/p_2), коэффициент эжекции « u » (m_2/m_1) и геометрический параметр « a » (F_1/F_2).

Некоторые эксперименты были посвящены подготовке и экспериментальной проверки эмпирических коэффициентов ввода в математических моделей и эмпирических значений параметров объектов, которые играют важную роль в расчетах и проектировании технических средств:

- Расстояние заднюю кромку активного эжекторного сопла перед входом в смесительную камеру « b »;

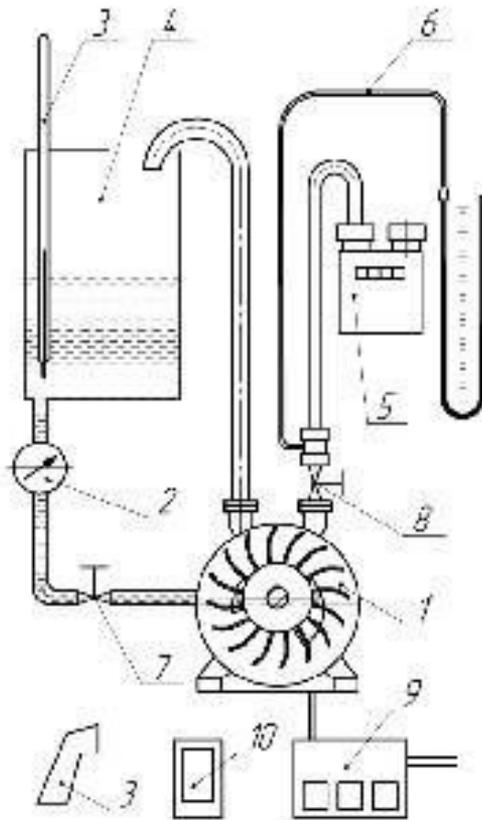
- влияние частоты « ω » и амплитуды « A » пульсации эжекторов на параметры его работы [11].

3.2 Разработка и изготовление экспериментальных лабораторных установок

Для экспериментального подтверждения наших теоретических положений и оптимальности рассчитанных параметров эжектора с пульсирующим движением активного потока, приведенных в главах 1 и 2 были разработаны экспериментальные установки. Экспериментальные исследования водокольцевого вакуумного насоса были проведены в производственных условиях.

Лабораторная установка для исследования вакуумного насоса ВВН-0,25

Экспериментальная установка для исследования водокольцевого вакуумного насоса представлена на рисунке 3.1.

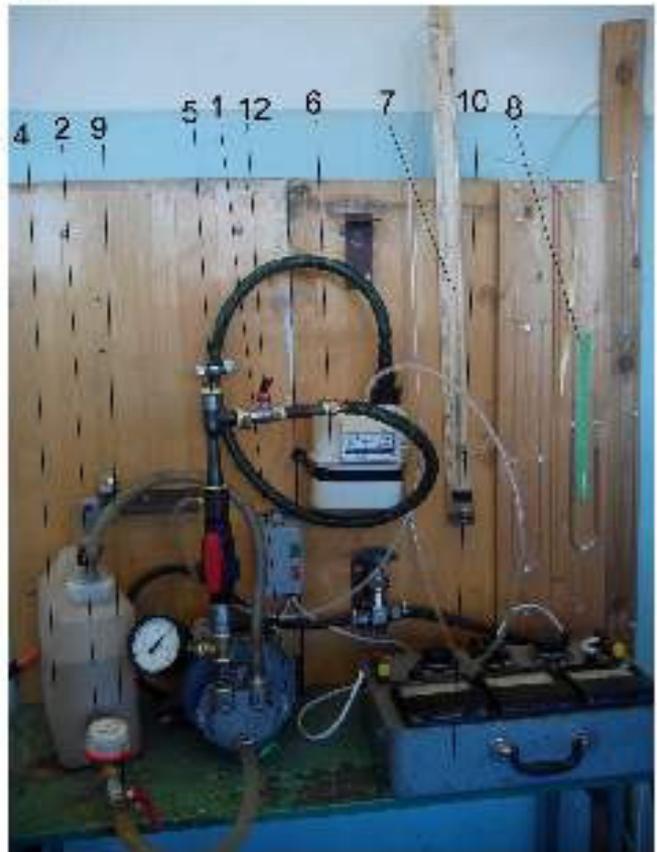
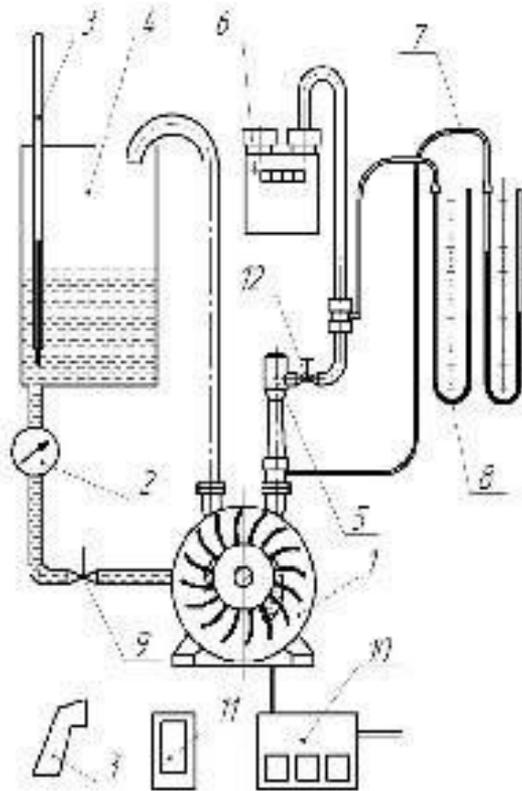


1 - водокольцевой вакуумный насос; 2 - счетчик расхода воды; 3 - цифровой инфракрасный термометр HT-822; 4 - водосборник; 5 - счетчик расхода воздуха; 6 - манометр на входе в вакуумный насос; 7 - вентиль для регулирования подачи воды; 8 - вентиль регулирования воздуха; 9 - измерительный комплект К-50; 10 - метеостанция Ea2 BL508

Рисунок 3.1 - Экспериментальная установка для исследования водокольцевого вакуумного насоса

Исследование водокольцевого вакуумного насоса ВВН-0,25 были проведены при разных температурах рабочей жидкости. Рабочую жидкость каждый раз подогревали до определенной температуры (20 °С, 25 °С, 30 °С, 35 °С). Температуру рабочей жидкости измеряли цифровым инфракрасным термометром, для измерения потребляемой мощности применяли измерительный комплект К-50, для измерения расхода воздуха использовали счетчик ВК-С4, а для воды СГВ-15.

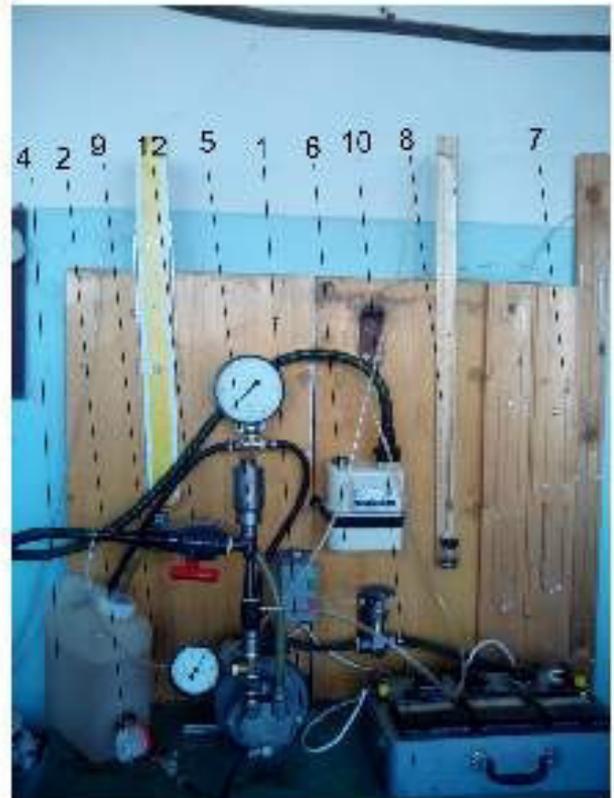
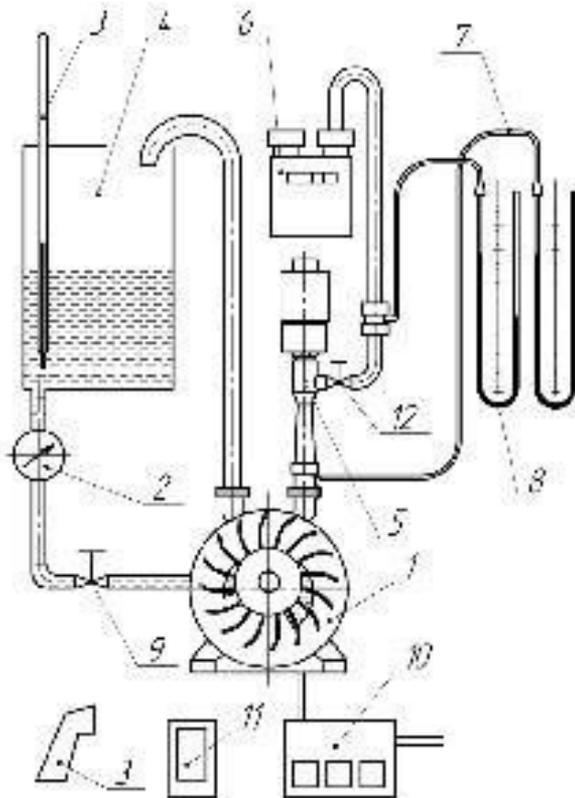
Для исследования эжектора вакуумного агрегата со стационарным движением активного потока разработана экспериментальная установка, которая представлена на рисунке 3.2.



1 – водовольцевой вакуумный насос, 2 – счетчик расхода жидкости, 3 – цифровой инфракрасный термометр HT-822, 4 – водосборник, 5 – эжектор, 6 – счетчик расхода воздуха, 7 – манометр для замера давления во всасывающем окне водовольцевой вакуумного насоса, 8 – манометр для замера давления в пассивном сопле, 9 – вентиль для регулирования подачи воды, 10 – измерительный комплект К – 50, 11 – метеостанция Ea2 BL508, 12 – вентиль для регулирования воздуха

Рисунок 3.2 – Экспериментальная установка для исследования эжектора вакуумного агрегата со стационарным движением активного потока

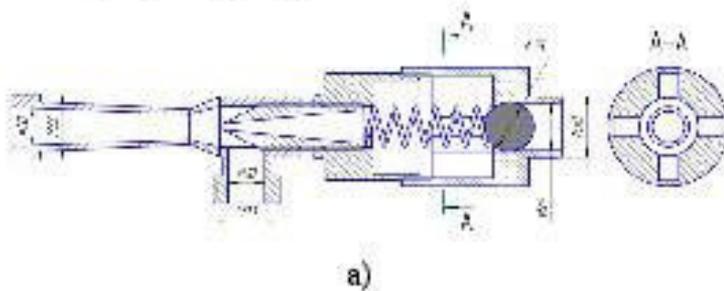
Экспериментальная установка для исследования эжектора вакуумного агрегата с пульсирующим движением активного потока с регулирующим элементом клапанного типа представлен на рисунке 3.3 .



1 – водокольцевой вакуумный насос, 2 – счетчик расхода жидкости, 3 – цифровой инфракрасный термометр HT-822, 4 – водосборник, 5 – эжектор с пульсирующим элементом клапанного типа, 6 – счетчик расхода воздуха, 7 – манометр на всасывающем окне водокольцевого вакуумного насоса, 8 – манометр на пассивном сопле, 9 – винтель для регулирования подачи воды, 10 – измерительный комплект К – 50, 11 – метеостанция Ea2 BL50S, 12 – винтель для регулирования воздуха

Рисунок 3.3 – Установка для исследования эжектора вакуумного агрегата с пульсирующим движением активного потока аппаратом клапанного типа

На рисунке 3.4 показан эжектор с пульсирующим с элементом клапанного типа (шарик), разработанный в Казанском ГАУ.

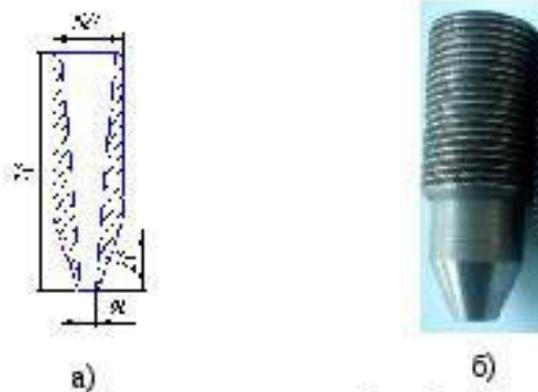


а - схема эжектора с пульсирующим потоком

б - общий вид эжектора с пульсирующим активным потоком

Рисунок 3.4 - Эжектор с пульсирующим движением активного потока с регулирующим элементом клапанного типа

На рисунке 3.5 показаны схема а и общий вид б устройства подвода активного воздуха.



а - схема устройства подвода активного воздуха; б - общий вид устройства подвода активного воздуха

Рисунок 3.5 - Схема и общий вид устройства подвода активного воздуха.

3.3 Контрольная аппаратура и измерительные приборы

Все экспериментальные установки оборудованы контрольной аппаратурой и необходимым количеством измерительных приборов. Часть приборов была изготовлена и оттарирована собственными силами, при этом использованы рекомендации.

Для изучения основных свойств эжектора вакуумного агрегата с пульсирующим движением активного потока, и проверки адекватности их экспериментальных и теоретических параметров, выполнены рекомендации и проведены замеры:

- подачи и температуру воды вакуумного водокольцевого насоса [5,9];
- величины создаваемого остаточного давления (вакуума);
- потребной мощности вакуумного насоса;
- частоты и амплитуды пульсации потоков в эжекторе [11].

Измерение расхода воздуха проводилось счетчиком газа ВК-Г4,

Измерение температуры рабочей жидкости водокольцевых вакуумных насосов проводилось инфракрасным термометром НТ-822, измерение расхода воды счетчиком СГВ-15 БЕТАР. Измерения атмосферного давления, температуры окружающей среды и ее влажности проводилось метеостанцией Еа2 ВL508.

Для измерения потребной мощности электродвигателя использовался прибор К - 51 (рисунок 3.11).

Величина измеренной мощности N определялись из выражения:

$$N = C_w \alpha_w, \text{ Вт} \quad (3.11)$$

где C_w – постоянная ваттварметра, Вт/дел,

α_w – значение по шкале ваттварметра, дел.

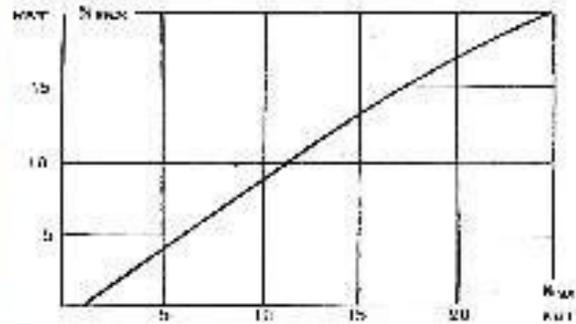


Рисунок 3.11 - Прибор для измерения Рисунок 3.12- Градировочный график потребляемой мощности К-51

Переход от мощности, потребляемой электродвигателем, к мощности, потребляемой вакуумным агрегатом, осуществлялся с помощью градировочного графика, приведенного на рисунке 3.12

3.4 Методика проведения экспериментальных исследований эжектора вакуумного агрегата с пульсирующим движением активного потока

В данном разделе приведены методика проведения экспериментов эжекторов вакуумного агрегата с пульсирующим движением активного потока ВВН-0,25Э и ВВН-0,25 ЭП.

3.4.1 Определение основных режимных и геометрических параметров эжекторов вакуумного агрегата с пульсирующим движением активного потока

В результате проведения совершенствования эжекторов вакуумного агрегата с пульсирующим движением активного потока, были спроектированы и изготовлены аппараты, имеющие наибольшее расчетное значение объемной подачи на входе Q_2 при заданном давлении p_2 и определены размеры проточной части, обеспечивающие эти параметры.

Методика проведения экспериментов приведены выше.

Выводы по разделу 3

1. Собран стенд и определены приборы для измерения пульсирующего и стационарного потока. Диапазон температур окружающей среды при работе датчиков составляет от 10 до 170 °С. Диапазон частот измеряемого давления находится в пределах от 0 до 10^4 Гц.

- Проведенные лабораторные экспериментальные исследования, и выявлены на средние значения. Также была определена необходимая мощность для движения воздуха в пульсирующем потоке. И она может быть снижена до 50 % по сравнению с мощностью, необходимой для стационарного потока одинаковой жидкости.

Анализ экспериментальных исследований позволяют:

- Уточнения и подтверждения экспериментально аналитические выражения для расчета параметров пульсирующего потока;

- зависимость необходимой мощности N водокольцевого вакуумного насоса, эжектора вакуумного агрегата со стационарным и пульсирующим движением активного потока

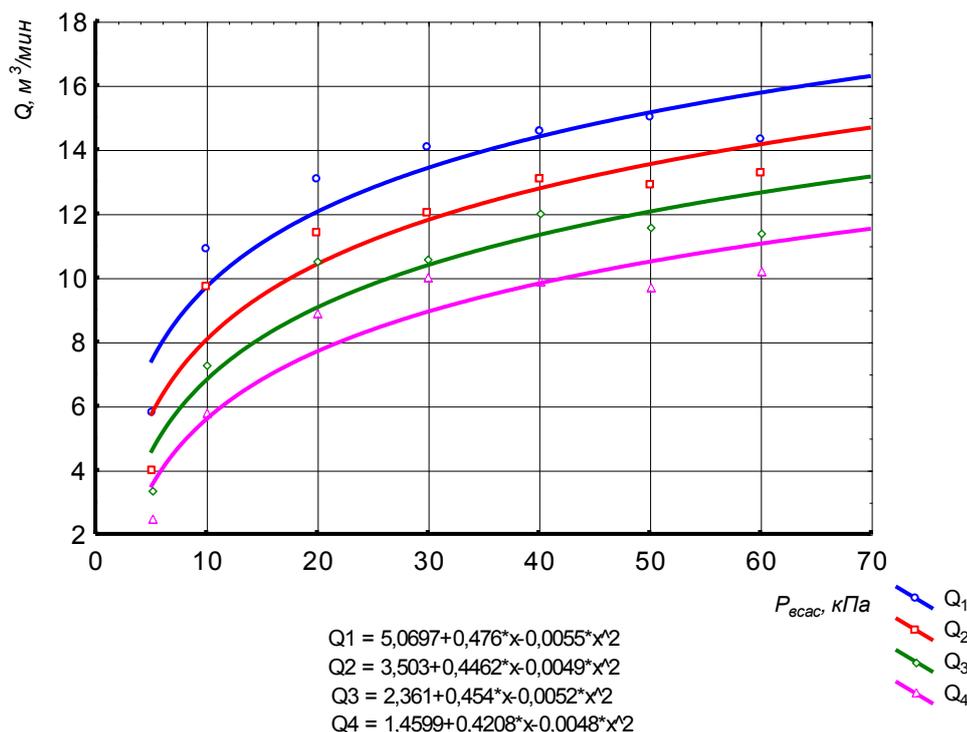
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В разделе приведены результаты экспериментальных исследований вакуумного водокольцевого насоса ВВН-0,25, стационарных ВВН-0,25Э и пульсирующих ВВН-0,25ЭП эжекторов в составе жидкостно-кольцевых вакуумных насосов ВВН-0,25.

4.1. Анализ результатов экспериментальных исследований вакуумного водокольцевого насоса ВВН-0,25

Были определены зависимости подачи $Q_{нас}$ от давления $P_{нас}$ для различных температурах рабочей жидкости t .

На рисунке 4.1 приведены зависимости $Q_{нас}=f(P)_{нас}$ для различных температур рабочей жидкости – воды, объем которой составлял $0,008 \text{ м}^3$.



Q_1 – при температуре рабочей жидкости $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; Q_2 – при $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; Q_3 – при $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$; Q_4 – при $t = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

Рисунок 4.1 - Зависимость подачи Q водокольцевого вакуумного насоса ВВН-0,25 от давления P при различных температурах рабочей жидкости t

Отмеченные зависимости имеют значение при рециклической подаче воды, так как с увеличением ее температуры значительно снижается подача насоса $Q_{нас}$. В том случае, когда слив воды осуществляется без рецикла, например, в канализацию, большее значение имеет ее расход.

Из приведенных зависимостей видно, что подача уменьшается с ростом температуры рабочей жидкости. В зимний период, при температуре воды ниже 20°C, подача значительно увеличивается. При рециркуляционной подаче воды, особенно при малом объеме бака, температура ее повышается и в ряде случаев необходимо использовать искусственное охлаждение. Следует также отметить, что если при работе водокольцевого вакуумного насоса температура воды превысит 40°C, то необходимо ее самоохлаждение. Для того чтобы температура рабочей жидкости не превышала указанную температуру, необходимо либо увеличить объем бака, либо использовать проточную воду.

4.2 Зависимость подачи водокольцевого вакуумного насоса с предвключенным стационарным (ВВН-0,25Э) и пульсирующим (ВВН-0,25ЭП) эжектором от величины входного давления $p_{вх}$

Величину создаваемого остаточного давления изменяли в пределах от 2,4 до 40 кПа - в зоне активного изменения остаточного давления водокольцевого насоса.

Зависимость $Q_{нас}=f(P)_{нас}$ подачи водокольцевого вакуумного насоса и насоса предвключенным стационарным эжектором приведена на рисунке 4.2.

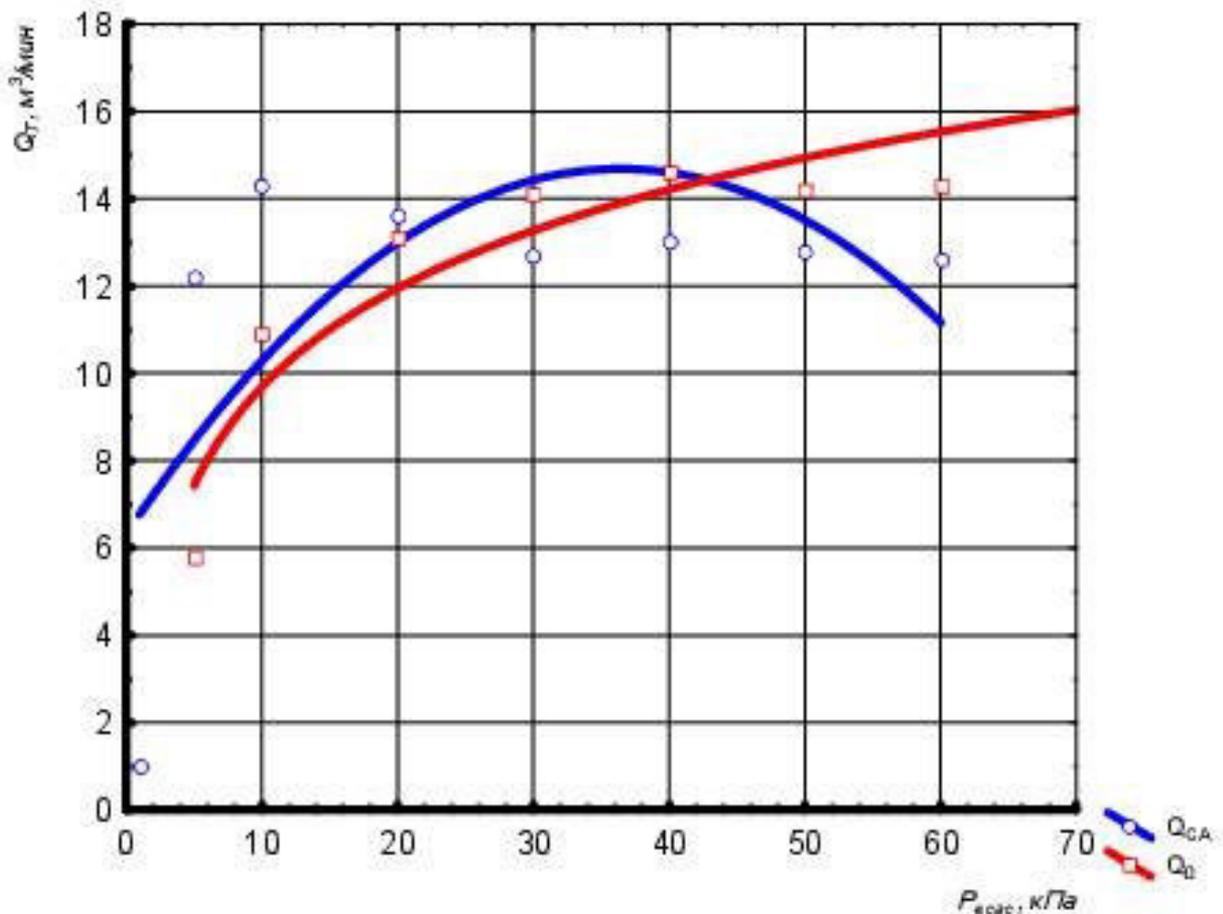


Рисунок 4.2 – Зависимость подачи водокольцевого вакуумного насоса и насоса с предвключенным стационарным эжектором

По графику видно, что предвключенный эжектор влияет на характеристику вакуумного насоса, а именно происходит увеличение подачи и вакуума.

На рисунке 4.3 приведена зависимость подачи водокольцевого вакуумного насоса с предвключенным пульсирующим эжектором $Q_2 = f(P_2)$ с металлическим шариком клапанного прерывателя подачи активного потока с различной частотой пульсаций f .

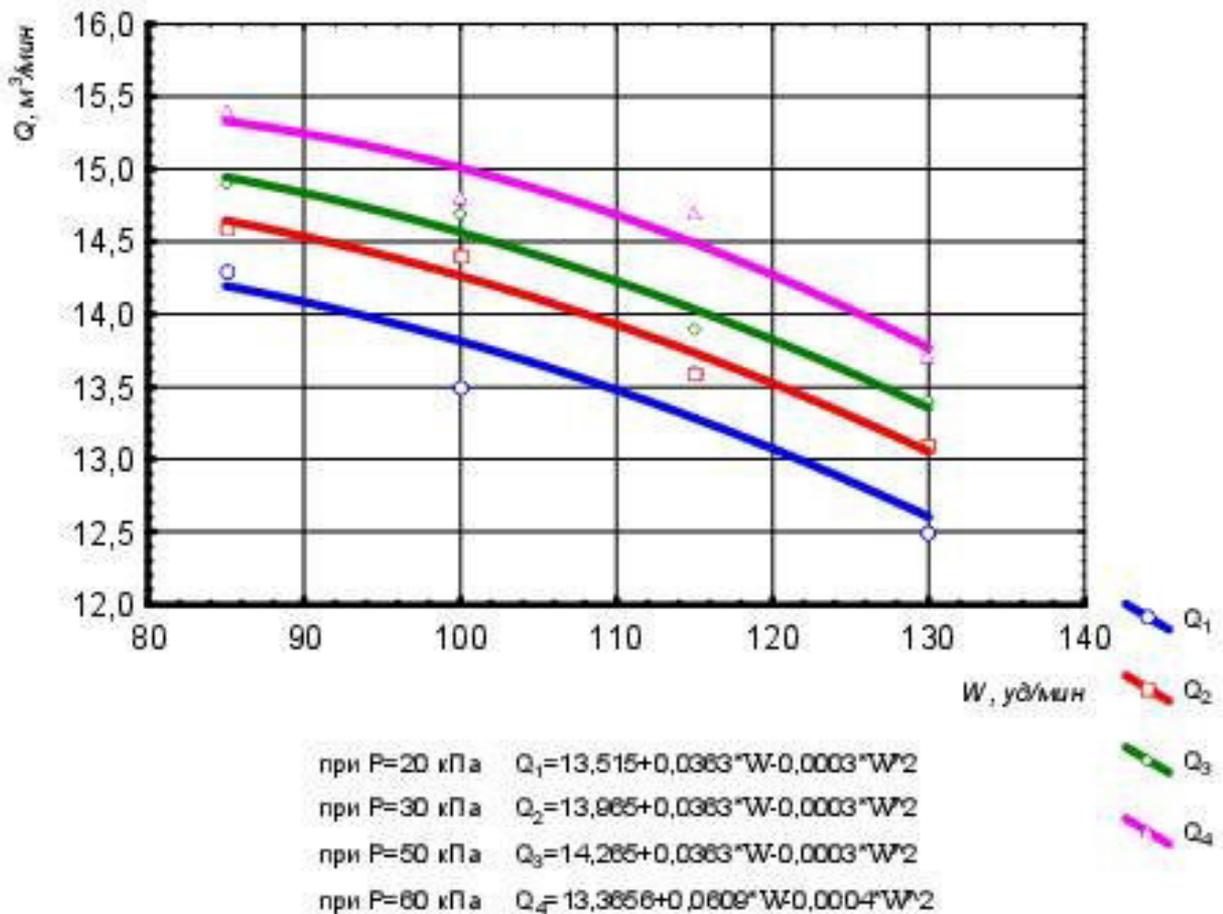


Рисунок 4.3 - Зависимость подачи водокольцевого вакуумного насоса ВВН-0,25 с предвключенным пульсирующим эжектором с металлическим шариком клапанного прерывателя подачи активного потока с различным давлением на входе в эжектор: 20, 30, 50 и 60 кПа

4.3 Зависимость потребляемой мощности N эжектора вакуумного агрегата со стационарным и пульсирующим движением активного потока от величины входного давления p_2

Целью исследования явилось определение взаимосвязи между потребляемой мощностью N и величиной остаточного давления вакуумного водокольцевого насоса ВВН-0,25 $p_{\text{ост}}$, предвключенного стационарного ВВН-0,25Э и пульсирующего ВВН-0,25ЭП эжектора. Характер этих зависимостей показан на рисунке 4.4.

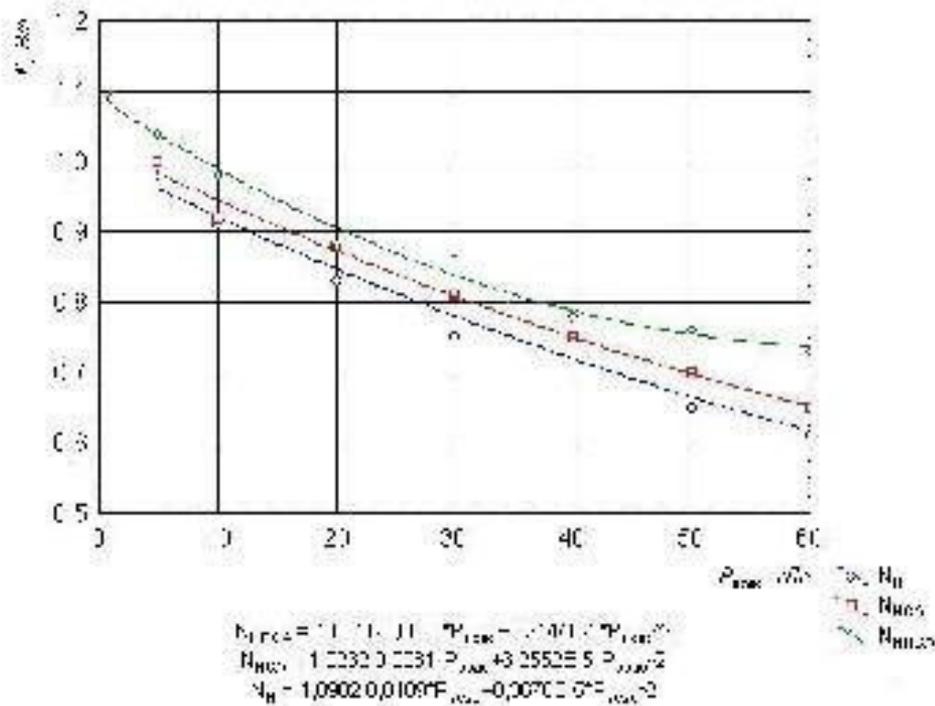


Рисунок 4.4 - Зависимость потребной мощности N водокольцевого вакуумного насоса ВВН-0,25, предвключенного стационарного ВВН-0,25Э и пульсирующего ВВН-0,25ЭП эжектора.

Анализ приведенных зависимостей показывает незначительное увеличение потребной мощности при значительном понижении остаточного давления в системе.

Выводы по разделу 4

Экспериментальные исследования подтвердили:

- теорию взаимодействия газообразных сред с рабочими элементами оборудования, в том числе теорию взаимодействия газоструйных аппаратов, как для транспортировки, так и для перемешивания,
- оптимальность параметров транспортирование и смешивание жидких и газообразных сред стационарными и пульсирующими эжекторами.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ литературных источников состояния пульсирующих эжекторов, который выявил неразработанные и слабо разработанные стороны.
2. Приведены математические модели движения пульсирующего активного потока воздуха, позволяющие обосновать геометрические и режимные параметры в эжекторе вакуумного насоса.
3. Определены рациональные геометрические и режимные параметры эжектора вакуумного агрегата с пульсирующим движением активного потока. При снижении частоты пульсации наблюдается увеличение подачи вакуумного агрегата. Рациональным материалом шарика пульсирующего устройства клапанного типа является металлическое исполнение.
4. Проведены лабораторные исследования водокольцевого вакуумного насоса с пульсирующим движением активного потока воздуха с клапанным прерывателем. Лабораторные исследования показали снижение остаточного рабочего давления эжектора вакуумного насоса в 6...8 раз по сравнению с работой вакуумного насоса без эжектора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика. /Г.Н.Абрамович// В 2-х ч. 4.2: Учеб. рук. для вузов М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 2011. - 304 с.
- 2 Александров, В.Ю. Оптимальные эжекторы. Теория и расчет. /В.Ю. Александров// М.: Машиностроение, 2012. - 136 с.
- 3 Алешкин, В.Р. Механизация животноводства. /В.Р. Алешкин, П.М. Рощин// М.: Агропромиздат, 1993. - 336 с.
- 4 Аркадов, Ю.К. Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы. /Ю.К. Аркадов// М.: Физмат литература, 2001. - 336 с.
- 5 Арсеньев, В.М. Агрегатирование эжектором водокольцевого вакуум-насоса. /В.М. Арсеньев, С.С. Мелейчук, Д.А. Левченко// Компрессорное и энергетическое машиностроение. Сумы, 2009. - №13 (17). - с. 64-67.
- 6 Давлетшин, И.А. Гидродинамические и тепловые процессы в пульсирующих турбулентных потоках. /И.А. Давлетшин// Автореф. дисс. на соиск. уч. степени д-ра техн. наук. - Казань: 2009. - 42 с.
- 7 Демихов, К.Е. Вакуумная техника: справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др., под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова// М.: Машиностроение, 2009. - 590 с.
- 8 Дурасов А.А. Повышение эффективности жидкостных струйных насосов путем реализации возможностей нестационарной эжекции: дисс... к.т.н.: 05.04.13 /Челябинск 2009. - 159 с.
- 9 Коба, В.Г. Механизация и технология производства продукции животноводства. /В.Г. Коба, Н.В., Д.Н. Брагинец, В.Ф. Мурусидзе, В.Ф. Некрашевич// М.: Колос, 2000. - 528 с.
- 10 Кожитов, Л.В. Технологическое вакуумное оборудование. Ч.1. Вакуумные системы технологического оборудования. /Л.В. Кожитов, А. Ю. Зарапин, Н.А. Чиченов// М.: «Руда и Металлы». 2001 - 416 с.
- 11 Нафиков, И.Р. Использование струйных аппаратов. /И.Р. Нафиков// Труды инж. фак-та Казанского ГАУ. – Казань: изд-во КГАУ, 2005. - с. 161-166.

12 Нафиков, И.Р. Использование струйных аппаратов в промышленности и в сельском хозяйстве. /И.Р. Нафиков// Материалы научной конф. ФМСХ и ФТС. Казань: изд-во КазГАУ, 2006. - с. 12 -15.

13 Нафиков, И.Р. Развитие теории струйных аппаратов. //И.Р. Нафиков, А.И. Рудаков// Труды инженерного фак-та Казанского ГАУ. Матер, науч. конф. ФМСХ и ФТС. Казань: Изд-во ГАУ, 2006. -Т.73. -с.46-49.

14 Нафиков, И.Р. Экспериментальная установка для исследования пульсирующего струйного аппарата. /А.И. Рудаков, Б.Л. Иванов, С.П. Васильев// Матер, Всероссийской науч.-практ. конф. Том 77 ч.2. Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2010. - с. 205 – 207.

15 Нафиков, И.Р. Результаты испытаний пульсирующего эжектора в составе водокольцевого вакуумного насоса. /И.Р. Нафиков, Б.Л. Иванов, А.И. Рудаков// Materiály XI mezinárodní vědecko - praktická conference «Efektivní nástroje moderních věd – 2015». Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o - 112 stran - с. 16-19.

16 Райзман, И.А. Жидкостнокольцевые вакуумные насосы и компрессоры. /И.А. Райзман// Казань: 1995. - 258 с.

77 Рудаков, А.И. Современные принципы разработки и совершенствования технических объектов в животноводстве. /А.И. Рудаков// Казань: Изд - во Казан. Ун-та, 2002 – 304 с.

17 Рудаков, А.И. Струйные низковакуумные аппараты. /А.И. Рудаков// Изд – во Казанского ГАУ, Казань: 2008. - 387 с.

18 Хансуваров, К.И. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара. /К.И. Хансуваров, В.Г. Цейтлин// М.: Изд-во стандартов, 1990. - 287 с.

19 Хусаинов Р.К. Обзор существующих конструкций водокольцевых вакуумных насосов // Р.К.Хусаинов, И.Р.Нафиков, Р.Р.Шарафиев / В сборнике: Агроинженерная наука XXI века. Научные труды региональной научно-практической конференции . 2018. С. 175-179.

20 Шарафиев Р.Р. Результаты экспериментальных исследований пульсирующего струйного аппарата используемых в сельскохозяйственном

производстве // Р.Р.Шарафиев, И.Р.Нафиков, Р.К.Хусаинов / В сборнике: Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция «Современные достижения аграрной науки», посвященная памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, профессора, академика академии Аграрного образования, лауреата Государственной премии РФ в области науки и техники, заслуженного изобретателя СССР Гайнанова Хазиба Сабировича, Казанский государственный аграрный университет. Казань, 2021 (в печати).

21 А.с. 823656 СССР, М. Кл³ F 04 F 5/00. Струйный аппарат /Ю.А. Цепляев, А.Н. Шендель (СССР). - № 2790572/25-06. Заявл 09.07.79; опубл 23.04.81, бюлл №15. - 2 с.

22 А.с. 981706 СССР, МКИ 3 F 04 F 5/00. Пульсационный струйный насос /Ж.И. Сопленков и др. (СССР).-№ 3281322/25-06. Заявл 23.04.81; опубл 15.12.82, бюлл №46.-2 с.

23 А.с. 989164 СССР, М. Юк P04P 5/02. Струйный аппарат /Г. Б. Ройзенблат, В. К. Беляков и Л. М. Еленин (СССР).-№3297807/25-06. Заявл 03.06.81; опубл.15.01.83, бюлл.№2.-2 с.

24 А.с. 1257302 СССР, МКИ 4 F 04 F 5/04. Импульсный струйный аппарат /Г.М. Тимошенко и др. (СССР).-№ 4758244/29. Заявл. 13.11.80; опубл. 15.02.82, бюлл. №6.-3 с.

25 А.с. 1465097 СССР, МКИ 4 В 01 F 5/04. Устройство для смешивания жидкостей в резервуарах /А.Н. Семенов, А.И. Рудаков (СССР).- № 4243342/31-26. Заявл. 11.04.87; опубл. 15.03.89, бюлл. № 10.- 2 с.

26 А.с. 1503870 СССР, МКИ 4 В 01, F 5/04. Эжекторный смеситель /А.И. Рудаков, А.Н. Семенов, Р.З. Сулейманов (СССР). - № 4381067/30-26. Заявл 19.11.87; опубл 30.08.89, бюлл № 32. - 4 с.

27 А.с. 1618904 СССР, МКИ F 04 F 5/20. Импульсно-струйный насос /Г.М. Тимошенко и др. -4758244/29; Заявл. 13.11.89; опубл. 15.02.92, бюлл. № 6.-3 с.

28 Патент 2097606 РФ, МКИ 6 F 04 F 5/04. Пульсирующий эжектор /А.И.Рудаков, Н.М.Асадуллин (Россия).-№94009704/06, заявл.5.03.94; опубл 27.11.97, бюлл. №33.- 4 с.

29 Патент 2418994 РФ, МПК F04F 5/20, F04F 5/52, F15B 21/12. Пульсатор для смешивания и транспортирования жидкостей и газов /А.И.Рудаков, Нафиков

И.Р., Иванов Б.Л. (Россия).-№2009123699/06, заявл. 22.06.09; опубл. 20.05.11, бюлл. №14 . - 9 с

30 Патент на полезную модель 88079 РФ МПК F 04 F 5/04. Струйный аппарат с прерывистой подачей активной среды /А.И. Рудаков, И.Р. Нафиков, Б.Л. Иванов (Россия).-№2009118123/22. Заявл. 13.05.2009; опубл. 27.10.2009, бюлл. №33. - 2 с.

31 Патент на полезную модель «Струйный распылитель жидкостей» РФ № 123475 / Иванов Б.Л., Лушнов М.А., Маркин О.Ю., Нафиков И.Р., Рудаков А.И.// Заявл 28.02.2012; опубл. 27.12.2012; бюлл. №36.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Результаты эксперимента по определению потребной мощности N водокольцевого вакуумного насоса ВВН-0,25, предвключенного стационарного ВВН-0,25Э и пульсирующего ВВН-0,25ЭП эжектора.

Таблица Б.1 – Значение мощности водокольцевого вакуумного насоса ВВН-0,25 от предвключенного стационарного и эжектора

№	$P_{\text{ж.к.}}$ $P_{\text{в}}$	$N, \text{кВт/л}$	Среднее значение	$N, \text{кВт/л}$	Среднее значение	$N, \text{кВт/л}$	Среднее значение
		насос ВВН-0,25		струйный аппарат в составе ВВН-0,25		пульсирующий струйный аппарат в составе ВВН-0,25	
1	$1 \cdot 10^3$		-		-	1,07	1,09
				1,08			
				1,1			
				1,1			
				1,09			
2	$5 \cdot 10^3$	0,98	0,98	1,07	1	1,04	1,04
		0,97		1		1,03	
		0,98		1,08		1,04	
		0,96		0,8		1,03	
		0,99		1,1		1,05	
3	$10 \cdot 10^3$	0,92	0,91	0,91	0,92	0,96	0,98
		0,9		0,92		0,98	
		0,93		0,93		0,97	
		0,91		0,94		0,99	
		0,9		0,92		1	
4	$20 \cdot 10^3$	0,82	0,83	0,86	0,88	0,86	0,88
		0,83		0,87		0,88	
		0,83		0,88		0,87	
		0,81		0,89		0,89	
		0,84		0,89		0,9	
5	$30 \cdot 10^3$	0,75	0,75	0,82	0,81	0,87	0,86
		0,74		0,82		0,85	
		0,75		0,81		0,86	
		0,73		0,8		0,86	
		0,76		0,81		0,85	
6	$40 \cdot 10^3$	0,77	0,78	0,75	0,75	0,77	0,79
		0,78		0,74		0,78	
		0,78		0,75		0,79	
		0,79		0,73		0,8	
		0,77		0,76		0,79	
7	$50 \cdot 10^3$	0,65	0,65	0,69	0,7	0,74	0,76
		0,66		0,69		0,76	
		0,65		0,68		0,75	
		0,67		0,71		0,77	
		0,64		0,71		0,77	
8	$60 \cdot 10^3$	0,61	0,61	0,66	0,65	0,74	0,73
		0,62		0,67		0,73	
		0,63		0,65		0,73	
		0,61		0,64		0,72	
		0,6		0,64		0,73	

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Результаты эксперимента по определению подачи водокольцевого вакуумного насоса ВВН-0,25 с предвключенным пульсирующим эжектором с металлическим шариком клапанного прерывателя подачи активного потока с различным давлением на входе в эжектор: 20, 30, 50 и 60 кПа

Таблица Б.1 – Значение подачи водокольцевого вакуумного насоса ВВН-0,25 с предвключенным пульсирующим эжектором при различных давлениях и частоты пульсации.

№	ω , уд./мин	Q, расход	Среднее значение	Q,	Среднее значение	Q,	Среднее значение	Q,	Среднее значение
		возд М ³ /ч		расход возд М ³ /ч		расход возд М ³ /ч		расход возд М ³ /ч	
P, кПа		при P=20 кПа		при P=30 кПа		при P=50 кПа		при P=60 кПа	
1	85	14,2	14,3	14,5	14,6	15	14,9	15,5	15,4
		14,3		14,6		14,8		15,5	
		14,4		14,7		14,9		15,4	
		14,3		14,4		14,8		15,5	
		14,2		14,7		14,9		15,3	
2	100	13,6	13,5	14,5	14,4	14,6	14,7	14,7	14,8
		13,7		14,5		14,5		14,8	
		13,4		14,4		14,7		14,7	
		13,3		14,4		14,7		14,6	
		13,5		14,3		14,8		15	
3	115	13,4	13,6	13,7	13,6	13,8	13,9	14,6	14,7
		13,6		13,5		13,8		14,5	
		13,6		13,6		13,9		14,6	
		13,5		13,4		14		14,8	
		13,7		13,6		14,1		14,9	
4	130	12,4	12,5	13	13,1	13,2	13,4	13,6	13,7
		12,3		13,2		13,3		13,7	
		12,5		13,1		13,4		13,8	
		12,5		13,2		13,5		13,5	
		12,6		13		13,6		13,7	

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Результаты эксперимента по определению подачи Q водокольцевого вакуумного насоса ВВН-0,25 от давления P при различных температурах рабочей жидкости t

Таблица В. 1 – Значение подачи водокольцевого вакуумного насоса ВВН-0,25 при различных температурах рабочей жидкости t

№	Р ж.к., Па	20 °С		25 °С		30 °С		35 °С	
		Q, расход вод. м ³ /ч	Среднее значение						
t _{раб. жид.} , °С									
1	5 · 10 ³	5,6	5,8	3,8	4	3,5	3,4	2,3	2,5
		5,9		3,9		3,2		2,5	
		5,7		4		3,3		2,4	
		6		4,1		3,1		2,6	
		5,8		4,2		3,7		2,7	
2	10 · 10 ³	10,7	10,9	9,2	9,1	7,6	7,3	5,6	5,8
		10,9		8,9		7,5		5,9	
		11,1		9		7,4		6	
		10,8		9,1		7,2		5,8	
		11		9,2		7		5,6	
3	20 · 10 ³	13,2	13,1	11,1	11,4	10,5	10,5	8,8	8,9
		13		11,4		10,6		8,7	
		13,3		11,3		10,5		9	
		13,1		11,5		10,4		8,8	
		12,9		11,6		10,4		9	
4	30 · 10 ³	14,3	14,1	11,8	12	10,8	10,6	10,2	10
		14		12,2		10,5		10,1	
		14,2		11,9		10,3		9,9	
		13,9		12		10,7		9,8	
		14,1		12,1		10,5		10	
5	40 · 10 ³	14,4	14,6	13,1	13,1	12,1	12	9,8	9,9
		14,6		13,2		12		9,9	
		14,8		13		11,9		10	
		14,5		12,9		12,1		10,1	
		14,7		13,1		11,8		9,7	
6	50 · 10 ³	14,1	15	12,9	12,9	12	11,6	10	9,7
		14,3		13		11,3		9,7	
		14		12,8		11,5		9,8	
		14,4		13,1		11,7		9,5	
		14,2		12,7		11,5		9,6	
7	60 · 10 ³	14,5	14,3	13,1	13,3	11,3	11,4	10	10,2
		14,3		13,1		11,6		10,2	
		14,1		13,2		11,5		10,1	
		14,4		13,4		11,2		10,3	
		14,2		13,5		11,3		10,4	