

На правах рукописи



Исмагилов Александр Рашидович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
ЖИДКОСТНО-ГАЗОВЫХ СТРУЙНЫХ НАСОСОВ**

Специальность

05.04.13 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) на кафедре гидравлики и гидропневмосистем

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Спиридонов Евгений Константинович

Официальные оппоненты: **Целищев Владимир Александрович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
заведующий кафедрой прикладной
гидромеханики;

Носков Александр Семенович
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный
университет имени первого президента
России Б.Н. Ельцина», заведующий кафедрой
гидравлики.

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Самарский государственный
аэрокосмический университет имени академика
С.П. Королева» (НИУ), г. Самара.

Защита диссертации состоится 11 декабря 2013 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.02 при ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) по адресу:

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ).

Автореферат разослан 29 октября 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, проф.



А.О. Чернявский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Жидкостно-газовые струйные насосы (ЖГСН, эжекторы) в силу простоты конструкции, многофункциональности и надежности широко распространены во многих отраслях промышленности: в металлургии, энергетике, химической, нефтегазовой, пищевой, машиностроительной и др.

В системах глубокого вакуумирования зачастую эжекторы работают на режимах, при которых к.п.д. не высок, а потребляемая мощность достигает чрезмерно больших величин. В струйных насосах потребляемую мощность обычно оценивают по давлению p_1 , которое необходимо для создания высоконапорной жидкой струи, и количеству жидкости $m_{ж}$, расходуемой в рабочем процессе аппарата. Например, в энергетике струйные аппараты широко применяются при вакуумировании конденсаторов паровых турбин и на режиме с абсолютным давлением $p_1 = 400...500$ кПа массовые расходы жидкости составляют $m_{ж} = 1\ 100...1\ 500$ т/ч. Если учесть, что на каждом энергоблоке мощностью 300 МВт работают два таких эжектора, то расходы воды на один энергоблок составят $m_{ж} = 2\ 200...3\ 000$ т/ч, а на ТЭС, содержащей, как правило, 6...8 энергоблоков – $m_{ж} = 13\ 000...24\ 000$ т/ч. В металлургии эжекторы применяются в процессах дегазации металла (метод внепечной обработки жидкого металла), где также присутствуют неоправданно высокие расходы рабочей среды. Так, расходы рабочей среды (пара) на работу пароструйных эжекторов составят 40 т/ч, а расходы воды на конденсаторы, входящих в эжекционный вакуумный агрегат, – $m_{ж} = 1\ 300...1\ 600$ т/ч при абсолютных давлениях в системе $p_1 = 1,0...1,2$ МПа. При длительной эксплуатации даже незначительное снижение массового расхода жидкости приводит к ощутимой экономии потребляемой мощности.

Таким образом, совершенствование существующих и разработка новых высокоэффективных струйных насосов составляют актуальную проблему для экономики России.

Степень разработанности темы исследования. Наиболее важными, с точки зрения вклада в изучение явлений, связанных со струйными аппаратами, являются труды Васильева Ю.Н., Цегельского В.Г., Ефимочкина Г.И., Бермана Л.Д., Кореннова Б.Е., Кудрина О.И., Носкова А.С., Соколова Е.Я., Зингера Н.М., Темнова В.К., Спиридонова Е.К., Целищева В.А., *Von Pawel-Rammigen G., Higgins H.W., Witte J.H., Cunningham R.G., Dopkin R.J.* и др.

В результате проведенных многочисленных и длительных исследований вышеперечисленными авторами были выявлены возможности и повышена эффективность работы ЖГСН. При этом было показано, что наибольшей эффективностью отличается работа эжектора при небольших степенях сжатия газа. Если мы уходим от этой области параметров, то эффективность аппарата резко снижается. Вместе с тем ряд авторов отмечают, что эффективность ЖГСН может быть повышена новой организацией рабочего процесса, а именно за счет воздействия на пассивный поток (Васильев Ю.Н., *Cunningham R.G., Dopkin R.J.*), осуществляя его предварительный разгон, а также за счет разрыва струи активного потока (Кудрин О.И., Спиридонов Е.К., Темнов В.К.).

Таким образом, ранее проведенные исследования внесли определенный вклад в более глубокое понимание рабочего процесса ЖГСН, благодаря чему удалось повысить его к.п.д. Однако детальное исследование рабочего процесса, которое показало вклад отдельных элементов эжектора (рабочей камеры, диффузора и др.) в общую эффективность аппарата, а также дало рекомендации по их выбору и использования при тех или иных режимах работы – отсутствует.

Цель и задачи работы. Цель работы – повышение эффективности ЖГСН в широком диапазоне изменения рабочих параметров за счет наиболее полной реализации потенциальных возможностей каждого элемента проточной части и изменений в протекании рабочего процесса аппарата.

Для достижения цели исследований были решены следующие задачи:

1. Предложена обобщенная схема ЖГСН, в которой используются мероприятия по плавному сжатию газа, а именно:

- а) осуществление двухступенчатого сжатия газа;
- б) трансформации избыточной кинетической энергии потока газожидкостной смеси;
- в) использование весового столба газожидкостной смеси.

2. Разработана математическая модель ЖГСН, рассчитаны и проанализированы его характеристики в различных вариантах исполнения.

3. Анализом характеристик выявлен вклад каждого элемента ЖГСН в общую степень сжатия газа и даны рекомендации по их применению.

4. Проведены экспериментальные исследования и натурные испытания ЖГСН.

5. Разработана универсальная методика расчета и проектирования ЖГСН, а также предложена его оригинальная конструкция.

6. Оценены потенциальные возможности мероприятий по воздействию на активный и пассивный потоки в увеличении к.п.д.

Научной новизной работы являются:

1. Комплексное описание рабочего процесса ЖГСН, учитывающее мероприятия по обеспечению постепенного сжатия газа.

2. Математическая модель ЖГСН, позволяющая определять характеристики аппарата и оценивать вклад каждого элемента в общую степень сжатия газа при различных режимах работы.

3. Диапазоны режимных параметров, при которых целесообразно применение каждого элемента ЖГСН.

4. Универсальная методика расчета и проектирования ЖГСН на основе разработанной математической модели и результаты экспериментальных исследований.

5. Доказана возможность в существенном повышении к.п.д. аппарата путем предварительного разгона пассивного потока или разрыва струи активного потока. Выявлен диапазон режимных параметров, при которых данные мероприятия наиболее оправданы.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложена новая обобщенная конструктивная схема ЖГСН, разработана универсальная методика его расчета и проектирования, практическая ценность которой заключается в возможности выбрать рациональную структуру и состав ЖГСН, определить

предпочтительные размеры проточной части аппарата и выявить его важнейшие характеристики, отражающие работу аппарата в переменных условиях. Новая обобщенная конструктивная схема и универсальная методика расчета и проектирования ЖГСН могут быть использованы в инженерной практике для проектирования новых и совершенствования существующих ЖГСН. Это позволит повысить эффективность этапов проектирования эжекторов, снизить временные затраты на их доводку. Результаты работы приняты к внедрению на Ириклинской ГРЭС (филиал ОАО «ИНТЕР РАО – Электрогенерация», Оренбургская обл., Новоорский р.-н, п. Энергетик) в соответствии с планом предприятия на 2014 г. и последующие годы. Двухступенчатый эжектор, разработанный на основе результатов работы, использован в системе вакуумирования рабочей камеры смесителя, установленной в комплексе технологического оборудования подготовки расплава полимеров к экструдированию на предприятии ООО «ИРП» (г. Челябинск).

На основе предложенной математической модели был разработан и спроектирован исследовательский комплекс со струйными насосами, который в настоящее время установлен в лаборатории кафедры гидравлики и гидропневмосистемы ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) и внедрен в учебный процесс.

Методология и методы исследования. Исследование рабочего процесса ЖГСН проводилось на основе фундаментальных уравнений состояния сред, неразрывности, количества движения и энергии. Анализ характеристик рабочих процессов аппарата проводился численным исследованием с помощью компьютерных пакетов MathCad и MS Excel, методами дифференциального и интегрального исчисления, математической статистики и теории вероятности. Опытная проверка результатов, полученных на основе предложенной математической модели, производилась на исследовательском комплексе и промышленных объектах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обобщенная схема ЖГСН.
2. Математическая модель ЖГСН.
3. Характеристики ЖГСН, устанавливающие взаимосвязь между основными режимными и геометрическими параметрами аппарата, влияющими на его рабочий процесс.
4. Универсальная методика расчета и проектирования ЖГСН, которая включает несколько этапов: 1) выбор приемлемого исполнения ЖГСН, а также рациональной структуры и состава аппарата; 2) расчет основных размеров проточной части аппарата, обеспечивающих минимальные расходы рабочей среды и энергии; 3) определение характеристик ЖГСН, отражающих его работу в переменных условиях.
5. Характеристики импульсного ЖГСН и эжектора с дополнительным побудительным устройством, позволяющие оценить потенциальные возможности данных аппаратов.

Степень достоверности результатов работы подтверждается использованием фундаментальных законов, описывающих течения сред в проточной части ЖГСН, их общепринятого описания с применением достоверных полу-

эмпирических данных. Основные положения и выводы доказываются аналитически и подтверждаются опытным путем. Обработка, обобщение и сравнение опытных данных с теоретическими производилось с помощью математического аппарата и компьютерных технологий, отвечающих современному уровню. Апробация результатов исследований и основных положений работы осуществлялась в публикациях автора и на научно-технических конференциях.

Апробация результатов работы. Основные результаты исследований, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на: XII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Гидромашины, гидроприводы, гидропневмоавтоматика» (МЭИ, г. Москва, 2008); Всероссийской научно-технической конференции «Динамика машин и рабочих процессов» (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2009); Научно-технической конференции «Динамика машин и рабочих процессов» (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2011); Третьей научной конференции аспирантов и докторантов (секция Технические науки, ЮУрГУ, г. Челябинск, 2011); 63-ей научной конференции преподавателей и сотрудников (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2011); Четвертой научной конференции аспирантов и докторантов (секция Технические науки, ЮУрГУ, г. Челябинск, 2012); IV Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы машиностроения» (Самарский областной дом науки и техники, г. Самара, 2012); Всероссийской научно-технической конференции «Динамика машин и рабочих процессов» (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2012); Пятой научной конференции аспирантов и докторантов (секция Технические науки, ЮУрГУ, г. Челябинск, 2013).

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы, включающего 148 наименований. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунок, 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определено место данной работы в цикле исследований, проводимых кафедрой гидравлики и гидропневмосистемы Южно-Уральского государственного университета на протяжении нескольких десятков лет, обоснована актуальность исследования, приводятся краткое содержание работы по главам, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследований, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе описана область применения, в которых существует целый ряд производств, проведение технологического процесса в которых возможно в т.ч. и при условии применения ЖГСН: в металлургии, энергетике, химической промышленности, нефтегазовой, пищевой, машиностроительной и др. Указаны конкретные примеры использования эжекторов в системах вакуумирования.

Приведена принципиальная схема традиционного ЖГСН и введены основные размерные и безразмерные параметры, характеризующие работу аппарата. Единство введенных символов сохраняется во всем тексте диссертации.

Патентный обзор и обзор исследований ЖГСН, выполненными отечественными и зарубежными учеными выявил два основных направления:

1) совершенствование через рациональное профилирование геометрии проточной части, включающей сопловое устройство, рабочую камеру, диффузор;

2) совершенствование через организацию нового рабочего процесса путем увеличения коэффициента скольжения фаз, двухступенчатого сжатия газа и обеспечения прерывистой подачи струи.

Глава завершается формулировкой цели и задач исследования.

Во второй главе предложена новая принципиальная схема ЖГСН в обобщенном исполнении (рис. 1), описан его рабочий процесс.

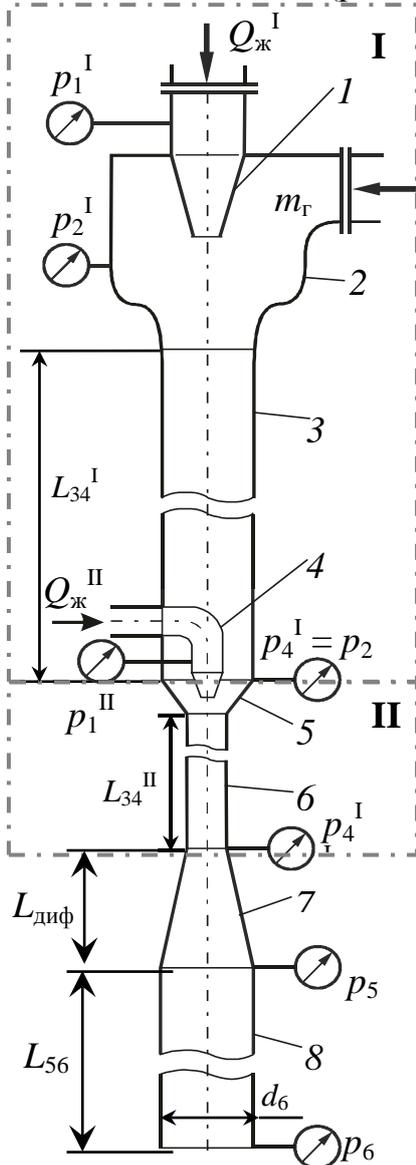


Рисунок 1. Обобщенная принципиальная схема ЖГСН

Данная модель струйного насоса позволяет осуществлять следующие мероприятия:

- 1) двухступенчатое сжатие газа;
- 2) трансформация избыточной кинетической энергии;
- 3) использование эффекта гравитации на завершающем участке проточной части струйного аппарата.

В зависимости от потребностей обобщенная схема ЖГСН может быть представлена в следующих вариантах исполнения, каждый из которых является применимым для определенной области (см. рис. 1, 2):

1) одноступенчатом варианте исполнения (сопло питания 1, приемная камера 2, камера смешения (рабочая камера) 3):

- а) без диффузора 7;
- б) с диффузором 7, но без вертикального цилиндрического насадка (ВЦН) 8;
- в) с диффузором 7 и ВЦН 8;

2) двухступенчатом варианте исполнения (сопла питания 1 и 4, приемная камера 2, камеры смешения (рабочие камеры) 3 и 6, конфузор 5):

- а) с диффузором 7, но без ВЦН 8;
- б) с диффузором 7 и ВЦН 8.

Основными размерными параметрами являются: массовый расход эжектируемого неконденсируемого газа $m_г$, объемные расходы активных потоков (жидкости) из сопла питания 1 первой ступени I $Q_ж^I$ и дополнительного сопла питания 4

второй ступени II $Q_ж^II$; абсолютные давления питания первой p_1^I и второй ступени p_1^II (давления нагнетания активных потоков перед соплом питания 1 первой ступени I и дополнительным соплом питания 4 второй ступени II); давления всасывания p_2^I (давление в приемной камере 2); противодавление p_6^II (выходное давление за ВЦН 8).

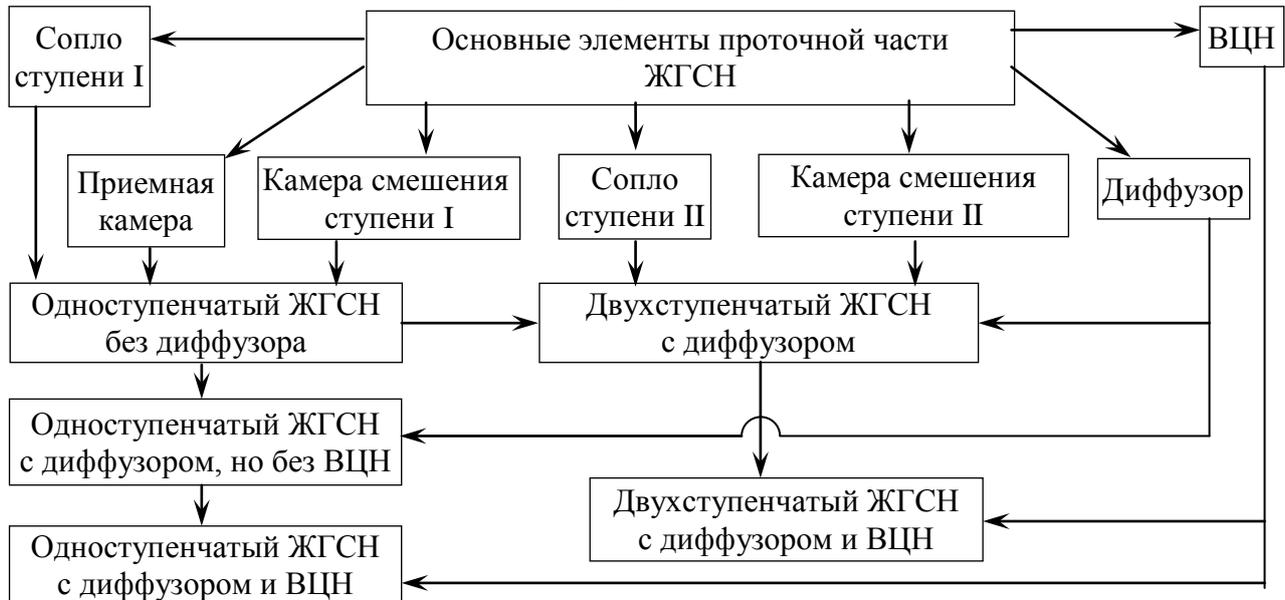


Рисунок 2. Структурная схема различных вариантов исполнения ЖГСН

Важными режимными параметрами для анализа эффективности рабочего процесса ЖГСН являются его внутренние параметры, а именно давления между ступенями: абсолютное давление на выходе первой ступени I p_4^I и давление на входе второй ступени II p_2^{II} ; давление перед диффузором на выходе второй ступени p_4^{II} и за диффузором p_5^{II} .

Важнейшими геометрическими параметрами являются относительная площадь сопла 1 первой Ω_{03}^I и второй 4 Ω_{03}^{II} ступеней, а также осевые размеры рабочей камеры 3 первой L_{34}^I и второй 6 L_{34}^{II} ступеней

Для математического моделирования рабочих процессов, происходящих в ЖГСН, были приняты следующие допущения:

1. Режим работы аппарата является неизменяемым во времени, т.е. установившимся.

2. Процессы, происходящие в проточной части аппарата, принимаем изотермическими, происходящими при температуре активных потоков первой и второй ступеней $T_{ж}^I = T_{ж}^{II} = T_{ж}$. При этом рабочая жидкость для первой и второй ступеней одна и та же.

3. Жидкость является несжимаемой, а газ – совершенным, удовлетворяющим уравнению состояния Клапейрона-Менделеева.

4. Подводящие и отводящие устройства (сопла, диффузор, конфузор, смесительные камеры) профилируются гидравлически совершенными, а осевые размеры смесительных камеры как первой ступени, так и второй ступеней являются достаточными для полного перемешивания сред, поэтому распределение скоростей в контрольных живых сечениях принимаем близким к равномерному.

5. Жидкость и газ не вступают в химические реакции.

Исходя из вышеизложенных допущений, на основе уравнений неразрывности течения потоков, состояния газа и жидкостно-газовой смеси, уравнений Д. Бернулли для потоков в сопловых каналах и ВЦН, количества движения для участков рабочей камеры первой I и второй II ступеней, течения жидкостно-газовой смеси в конфузоре и в диффузоре, была получена итоговая система уравнений для обобщенной схемы струйного насоса в размерной и безразмер-

ной форме, которая выглядит следующим образом.

$$\Gamma^I = 2 \cdot \varphi^2 \cdot (\varepsilon_{12}^I - 1) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{42}^I = 0,5 \cdot \left(\varepsilon_{42x}^I + \left((\varepsilon_{42x}^I)^2 - \frac{4 \cdot c^I \cdot \alpha_{2r}^I \cdot (\Omega_{03}^I)^2 \cdot \Gamma^I}{k_{\Pi 4}^I \cdot k_{\Gamma}} \right)^{0,5} \right); \quad (2)$$

$$\varepsilon_{42}^I \cdot \varepsilon_{32}^{\Pi} \cdot \left(1 + \frac{\delta_{r2} \cdot u_{\Gamma}^{\Pi}}{u_{ж}} \cdot \ln(\varepsilon_{42}^I \cdot \varepsilon_{32}^{\Pi}) \right) = 1 + (1 + u_{\Gamma}^I) \cdot (\varepsilon_{12}^{\Pi} \cdot \varepsilon_{32}^{\Pi} - 1) \times \\ \times \left((1 + \zeta_{\text{конф}}) \cdot \left(\frac{\Omega_{03}^{\Pi}}{1 - \Omega_{03}^{\Pi}} \cdot (u_{ж} + \delta_{r2} \cdot u_{\Gamma}^{\Pi} \cdot \varepsilon_{42}^I \cdot \varepsilon_{32}^{\Pi}) \right)^2 - (\Omega_{03}^{\Pi} \cdot \Omega_{\text{конф}} (u_{ж} + \delta_{r2} \cdot u_{\Gamma}^{\Pi}))^2 \right); \quad (3)$$

$$\Gamma^{\Pi} = 2 \cdot (\varphi^I)^2 \cdot (\varepsilon_{12}^{\Pi} / \varepsilon_{42}^I - 1) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{42}^{\Pi} = 0,5 \cdot \varepsilon_{32}^{\Pi} \cdot \left[z + \sqrt{z^2 - 4 \cdot \Gamma^{\Pi} \cdot c^{\Pi} \cdot (\Omega_{03}^{\Pi})^2 \cdot \delta_{r3}^{\Pi} \cdot u_{\Gamma}^{\Pi} \cdot (1 + u_{ж} + u_{\Gamma}^{\Pi})} \right]; \quad (5)$$

$$(1 + u_{ж}^{\Pi}) \cdot \frac{\varepsilon_{52}}{\varepsilon_{32}^{\Pi}} + \delta_{r3}^{\Pi} \cdot u_{\Gamma}^{\Pi} \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon_{52}^{\Pi}}{\varepsilon_{42}^{\Pi}}\right) + \frac{\Gamma^{\Pi}}{2} \cdot \left(1 + u_{ж} + \frac{\varepsilon_{32}^{\Pi} \cdot \delta_{r3}^{\Pi} \cdot u_{\Gamma}^{\Pi}}{\varepsilon_{52}} \right)^2 \times \\ \times \left(\frac{\Omega_{03}^{\Pi}}{\Omega_{\text{диф}}} \right)^2 \cdot (1 + u_{ж} + u_{\Gamma}^{\Pi}) = (1 + u_{ж}) \cdot \frac{\varepsilon_{42}^{\Pi}}{\varepsilon_{32}^{\Pi}} + \quad (6)$$

$$+ \frac{\Gamma^{\Pi}}{2} \cdot (\Omega_{03}^{\Pi})^2 \cdot \left(1 + u_{ж} + \frac{\varepsilon_{32}^{\Pi} \cdot \delta_{r3}^{\Pi} \cdot u_{\Gamma}^{\Pi}}{\varepsilon_{52}} \right)^2 (1 + u_{ж} + u_{\Gamma}^{\Pi}) \cdot (1 - \zeta_{\text{диф}});$$

$$\varepsilon_{62} = \varepsilon_{52} + \Pi_6 - \zeta_{56} \cdot \frac{\Gamma_{6c}^{\Pi}}{2}, \quad (7)$$

где $z = 1 + \Gamma^{\Pi} \cdot \Omega_{03}^{\Pi} \cdot \left(1 + (u_{ж} + u_{\Gamma}^{\Pi}) \cdot \frac{\Omega_{03}^{\Pi}}{1 - \Omega_{03}^{\Pi}} \cdot (u_{ж} + \delta_{r3}^{\Pi} \cdot u_{\Gamma}^{\Pi}) - c^{\Pi} \cdot \Omega_{03}^{\Pi} \cdot (1 + u_{ж} + u_{\Gamma}^{\Pi}) \cdot (1 + u_{ж}) \right)$.

Здесь $\Gamma^j = (\rho_{ж} \cdot (U_{ж0}^j)^2) / p_2^I -$ динамический параметр струи j -ой ступени; $\varepsilon_{12}^j = p_1^j / p_2^I -$ степень снижения давления на сопловом устройстве j -ой ступени; $\varphi^j -$ коэффициент скорости сопла j -ой ступени; $\varepsilon_{42x}^I = 1 + \Gamma^I \cdot \Omega_{03}^I \cdot (1 - c^I \cdot \Omega_{03}^I) -$ степень повышения давления в рабочей камере первой ступени I при холостом режиме работы струйного насоса ($m_{\Gamma} = 0$; $\alpha_{2r}^I = 0$); $\alpha_{r2}^I = Q_{r2} / Q_{ж}^I -$ объемный коэффициент эжекции; $k_{\Gamma} = T_{\Gamma} / T_{ж} -$ поправочный коэффициент на различие температур; $k_{\Pi i}^j = 1 - p_{н.п.} / p_i^j -$ поправочный коэффициент на давление насыщенных паров жидкости в i -ом сечении j -ой ступени. $\varepsilon_{62} = p_6 / p_2^I$, $\varepsilon_{52} = p_5 / p_2^I$, $\varepsilon_{42}^{\Pi} = p_4^{\Pi} / p_2^I$, $\varepsilon_{32}^{\Pi} = p_3^{\Pi} / p_2^I$, $\varepsilon_{42}^I = p_4^I / p_2^I -$ степени сжатия; $\delta_{ri}^{\Pi} = \rho_{ж} / \rho_{ri}^{\Pi} -$ относительный удельный объем газа; $u_{\Gamma}^j = m_{\Gamma} / m_{ж}^j -$ массовый коэффициент эжекции по газу j -ой ступени; $u_{ж} = m_{ж}^I / m_{ж}^{\Pi} -$ массовый коэффициент эжекции по жидкости; $c^j = 1 + 0,5 \cdot \zeta_{34}^j -$ параметр сопротивления для j -ой ступени; ζ_{34}^j , $\zeta_{\text{конф}}$, $\zeta_{\text{диф}}$ - коэффициенты сопротивления рабочей камеры j -ой ступени, конфузора и диффузора; $\zeta_{56} = \lambda_{56} \cdot L_{56} / d_6 -$ коэффициент сопротивления вертикального цилиндрического

канала; λ_{56} – коэффициент гидравлического трения вертикального цилиндрического канала; $\zeta_{\text{конф}}$ – коэффициент сопротивления конфузора; $\Omega_{\text{конф}}$ – относительное сужение конфузора; $\Omega_{03}^j = A_0^j / A_3^j$ – относительная площадь сопла j -ой ступени; $\Omega_{\text{диф}} = A_5 / A_4$ – относительное расширение диффузора. $\Pi_6 = \rho_{с6} \cdot g \cdot L_{56} / p_2^I$ – относительное весовое давление столба жидкостно-газовой смеси в ВЦН; $\Gamma_{6с} = \rho_{с6} \cdot (U_{с6})^2 / p_2^I$ – динамический параметр потока в ВЦН.

К.п.д. ЖГСН определяется по формуле:

$$\eta = \frac{m_{\Gamma} \cdot R_{\Gamma} \cdot T_{\text{ж}} \cdot \ln \frac{p_6}{p_2^I}}{Q_{\text{ж}}^I \cdot (\bar{p}_1^I - p_6) + Q_{\text{ж}}^{\text{II}} \cdot (\bar{p}_1^{\text{II}} - p_6)}. \quad (8)$$

Детально исследовались как одноступенчатый, так и двухступенчатый варианты исполнения ЖГСН. Итоговая система уравнений (1)-(7) является универсальной. В случае одноступенчатого варианта исполнения ЖГСН система состоит из уравнений (1), (2), (6) и (7), где u_{Γ}^{II} приравнивается к нулю.

Поиск наиболее эффективных режимов работы аппарата осуществлялся в два этапа. На первом этапе определялись экстремальные характеристики для первой ступени $\partial \alpha_{2\Gamma}^I / \partial \Omega_{03}^I = 0$, выражая $\alpha_{2\Gamma}^I$ из уравнений (1, 2, 6), и находилась взаимосвязь между параметрами ε_{42}^I (ε_{52}^I , ε_{62}^I), ε_{12}^I , $\alpha_{2\Gamma}^I$ и Ω_{03}^I , при которых имеем наилучшие показатели. На втором этапе выбирались режимы с наибольшим достижимым к.п.д. η аппарата в целом.

На основании математической модели были рассчитаны и построены безразмерные характеристики одноступенчатого (рис. 3, 4) и двухступенчатого (рис. 5, 6) вариантов исполнения ЖГСН, а также размерные характеристики (рис. 7-10).

При расчетах учитывались ограничительные условия по предельной структуре потока, по предельному коэффициенту скольжения фаз, по наличию пузырькового и дозвукового течений.

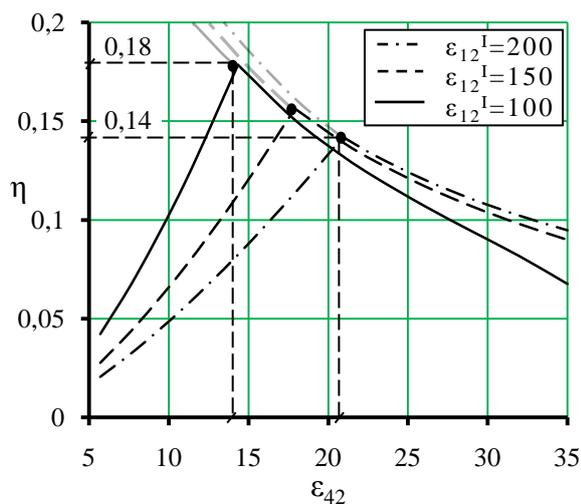


Рисунок 3. Зависимости к.п.д. от степени сжатия одноступенчатого ЖГСН без диффузора

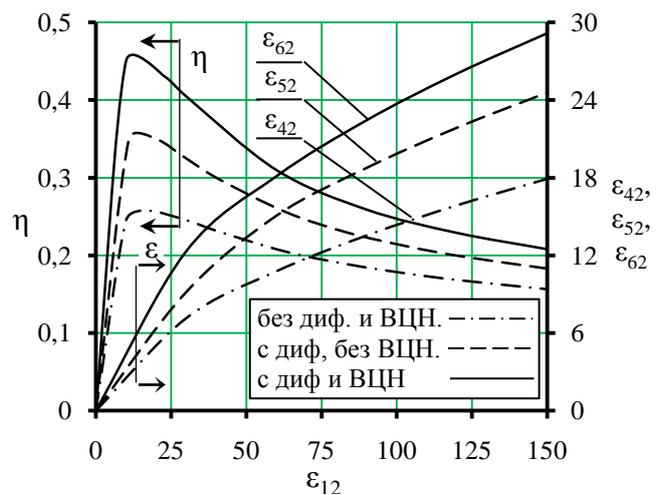


Рисунок 4. Достижимый к.п.д. и степень сжатия одноступенчатого ЖГСН

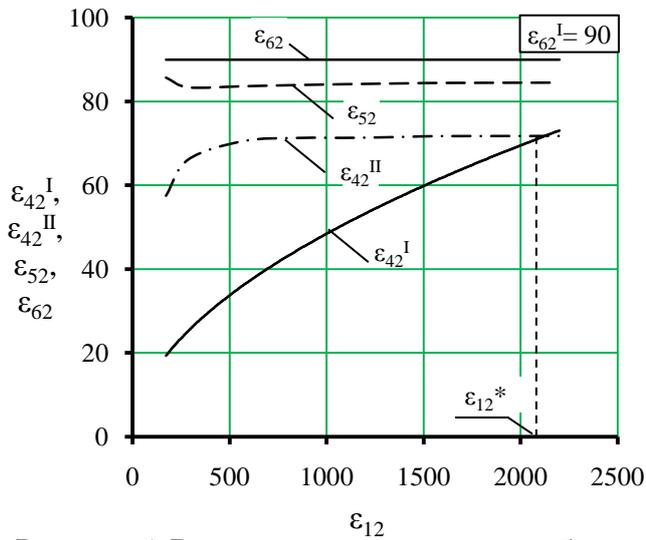


Рисунок 5. Вклад каждого элемента в общую степень сжатия двухступенчатого ЖГСН

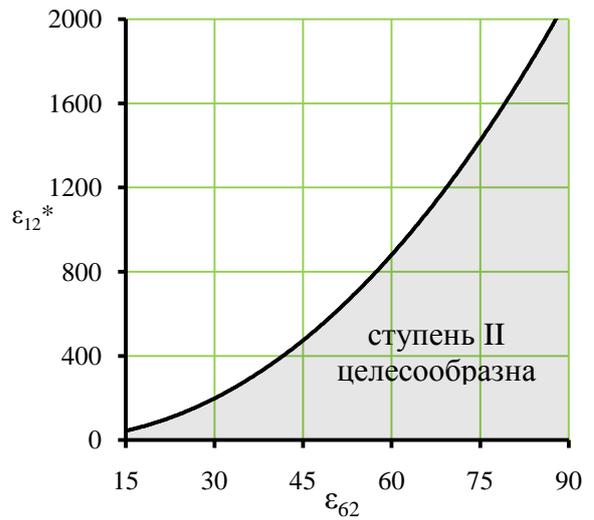


Рисунок 6. Зависимость предельной степени снижения давления на сопловом устройстве от степени сжатия двухступенчатого ЖГСН

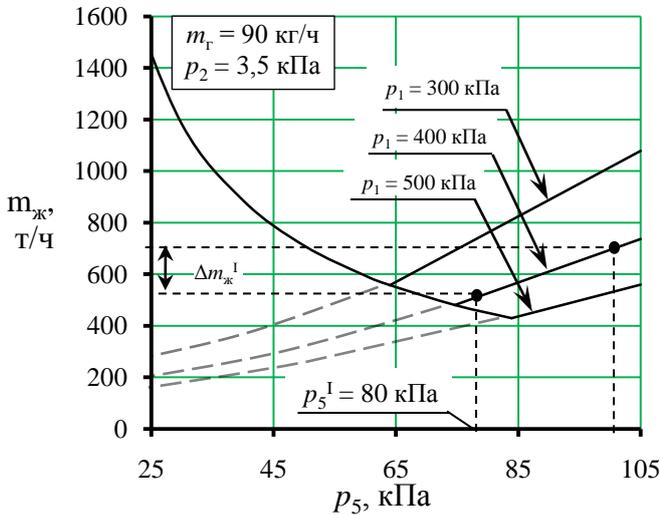


Рисунок 7. Массовый расход жидкости в зависимости от противодействия одноступенчатого ЖГСН с диффузором

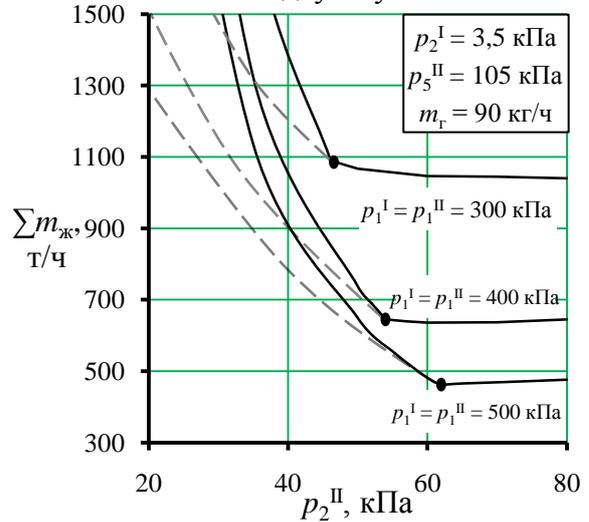


Рисунок 8. Суммарный массовый расход жидкости в зависимости от промежуточного давления двухступенчатого ЖГСН

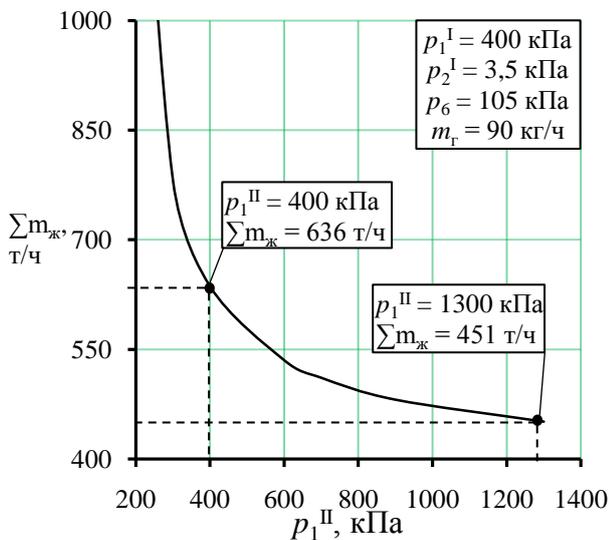


Рисунок 9. Влияние давления питания сопла второй ступени на суммарный массовый расход жидкости двухступенчатого ЖГСН

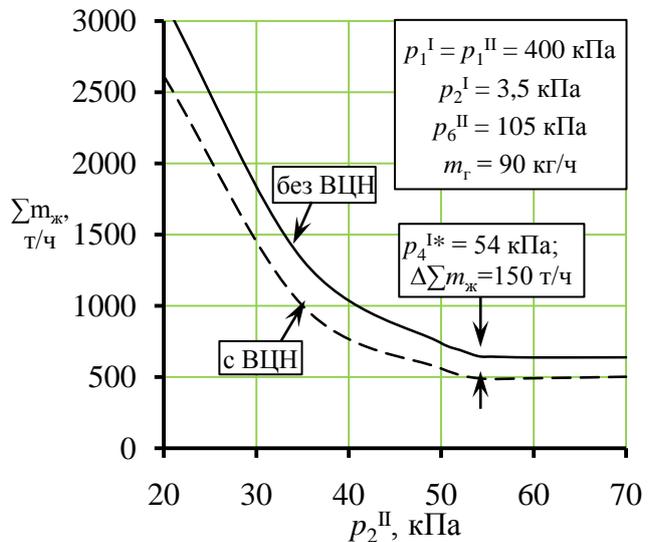


Рисунок 10. Влияние ВЦН на суммарный массовый расход жидкости двухступенчатого ЖГСН

Анализ характеристик показал, что:

1) для одноступенчатого варианта исполнения ЖГСН, включающего камеру смешения, диффузор и ВЦН, степень сжатия ε_{42} (ε_{52} , ε_{62}) растет с увеличением степени снижения давления на сопловом устройстве ε_{12} . Вклад каждого элемента в общую степень сжатия ε_{62} зависит от режима работы. Причем с увеличением параметров ε_{12} , α_{2r} данный вклад увеличивается. Существует такая взаимосвязь параметров, при которой эффективность работы аппарата наибольшая;

2) области ограниченные кривыми наибольших степеней сжатия одноступенчатого ЖГСН указывают на целесообразность применения диффузора и ВЦН;

3) при выполнении ЖГСН в двухступенчатом варианте исполнения важным внутренним параметром, отражающим эффективность его работы, является промежуточное давление $p_4^I = p_2^II$. Существует предпочтительная величина p_2^II , при котором аппарат работает с минимальным потреблением мощности;

4) эффективность применения двухступенчатого варианта исполнения ЖГСН зависит во многом от соотношения давления на сопловом устройстве первой ступени ε_{12}^I . С увеличением параметра ε_{12}^I вклад второй ступени в общую степень сжатия ε_{62} постепенно уменьшается и при определенном параметре ε_{12}^{I*} – равен степени сжатия первой ступени;

5) область целесообразного использования двухступенчатого варианта исполнения ЖГСН ограничена и лежит ниже кривой предельной степени снижения давления на сопловом устройстве ε_{12}^{I*} в зависимости от степени сжатия ε_{62} ;

6) при параметрах характерных для паротурбинных установок ($p_1 \approx 400$ кПа, $p_2 \approx 3,5$ кПа, $p_5 \approx 105$ кПа, $m_r \approx 90$ кг/ч) применение двухступенчатой системы вакуумирования может достигнуть экономии по расходу жидкости до 500...600 т/ч, что наглядно демонстрирует таблица 1, в то время как на реальных промышленных эжекторах расходы равны $\approx 1\ 100...1\ 500$ т/ч.

Таблица 1. Сравнение ожидаемых массовых расходов жидкости при различных вариантах исполнения ЖГСН

$m_r = 90$ кг/ч; $p_1^I = p_1^{II} = 400$ кПа; $p_2^I = 3,5$ кПа; противодавление 105 кПа;			
Наличие диффузора и ВЦН		$\sum m_{ж}$, т/ч	
Диффузор	ВЦН	Одноступенчатый ЖГСН	Двухступенчатый ЖГСН
–	–	812	857
+	–	737	636
+	+	537	490

На основе предложенной математической модели была разработана универсальная методика расчета и проектирования ЖГСН. Цель расчета и проектирования ЖГСН: создать аппарат, обеспечивающий заданные параметры, при минимальных расходах воды и энергии и по возможности размещения в заданных габаритах. Например, известны давления питания p_1^I , p_1^{II} , всасывания p_2^I , противодавление p_6 , температуры сред T_r и $T_{ж}$, массовый расход газа m_r . Необходимо определить какое будет при этом минимальное потребление рабочей среды $\sum m_{ж}$ и предпочтительные параметры Ω_{03}^I и Ω_{03}^{II} .

Универсальная методика расчета и проектирования ЖГСН, включает три этапа:

1) определение наиболее предпочтительной структуры и состав струйного насоса (основывается на характеристиках, представленных на рис. 4, 6, и габаритах аппарата);

2) расчет предпочтительных размеров проточной части аппарата (по методике на рис. 11);

3) определение характеристик струйного насоса (на основе базовых уравнений (1)-(7)).

Третья глава посвящена мероприятиям по повышению эффективности работы ЖГСН воздействием на активный и пассивный потоки.

Воздействовать на пассивный поток предлагается путем его предварительного разгона перед входом в рабочую камеру с помощью дополнительного побудительного устройства (ДПУ) (рис. 12).

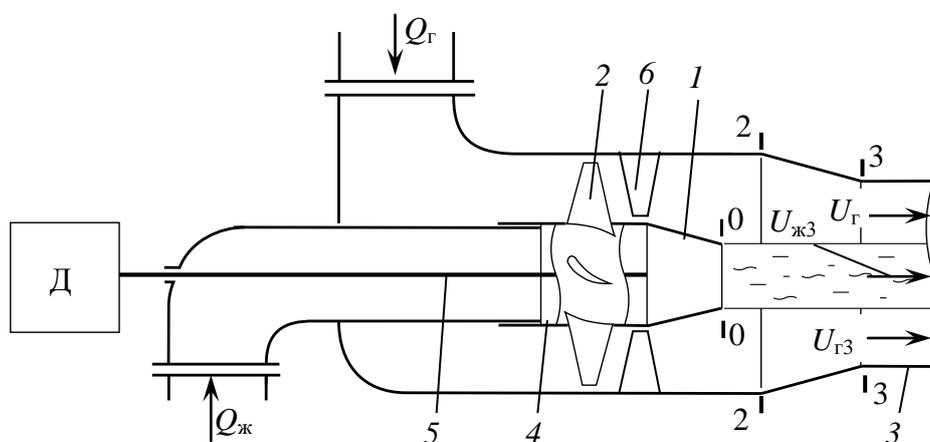


Рисунок 12. Схема ДПУ: 1 – сопло питания; 2 – лопастное колесо; 3 – камера смешения; 4 – центрирующие ребра; 5 – стержень; 6 – направляющий аппарат

На основе математической модели одноступенчатого варианта исполнения ЖГСН (1), (2), (6) без ограничения по коэффициенту скольжения фаз ψ^* , но при выполнении условия по предельной структуре потока, были рассчитаны характеристики такого аппарата и произведено сравнение с обычным эжектором (рис. 13, 14). При этом к.п.д. аппарата рассчитывался с учетом затрат энергии на разгон потока:

$$\eta = \frac{m_T \cdot R_T \cdot T_{ж} \cdot \ln \frac{p_5}{p_2}}{Q_{ж} \cdot (\bar{p}_1 - p_5) + \frac{\rho_{г3} \cdot U_{г3}^2}{2 \cdot \eta_{л.к.}} \cdot Q_{г3}} = \frac{\alpha_{г2} \cdot \ln \varepsilon_{52}}{k_T \cdot ((\varepsilon_{12} - \varepsilon_{52}) + n_{л.к.})}, \quad (9)$$

где $n_{л.к.} = \frac{\rho_{г3} \cdot \alpha_{г2}}{2 \cdot p_2 \cdot \eta_{л.к.}} \cdot \left(\psi \cdot \sqrt{\frac{p_2 \cdot \Gamma}{\rho_{ж}}} \right)^2$ – безразмерный параметр, учитывающий

затраты энергии на разгон потока;

$\eta_{л.к.} = 0,75 \dots 0,9$ – к.п.д. лопастного колеса.

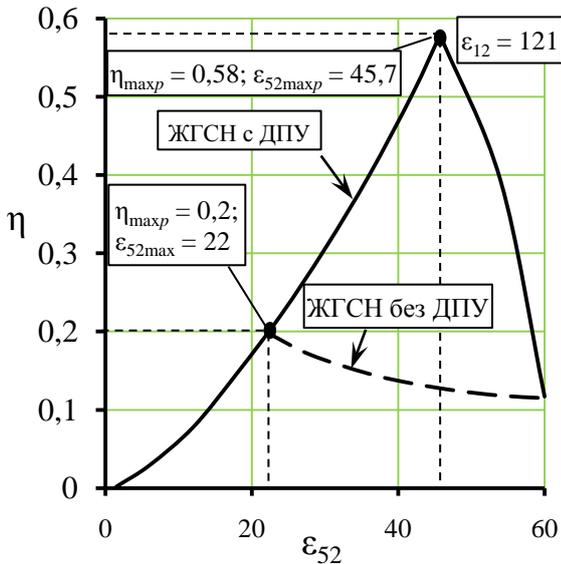


Рисунок 13. Сравнение к.п.д. и предельной степени сжатия ЖГСН с ДПУ и без него

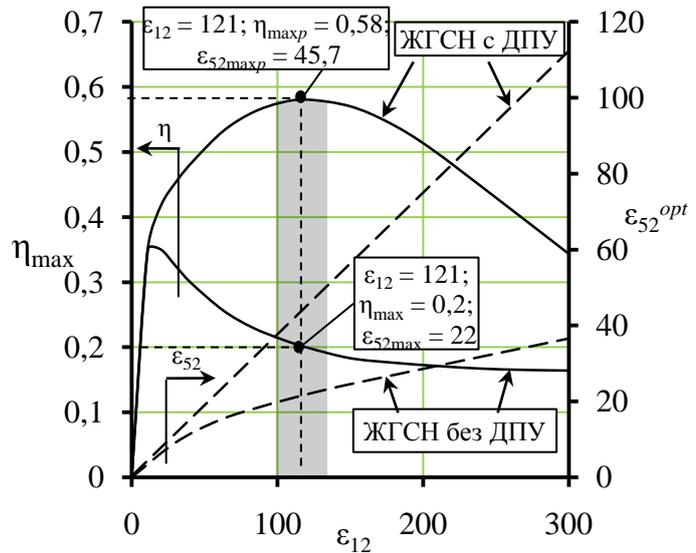


Рисунок 14. Сравнение к.п.д. и предельной степени сжатия ЖГСН с ДПУ и без него

Анализ графиков свидетельствует о следующем:

1) У ЖГСН с ДПУ и без него зависимость $\varepsilon_{52\max}(\varepsilon_{12})$ является монотонной, а $\eta_{\max}(\varepsilon_{12})$ – имеет экстремум.

2) Использование ДПУ приводит к увеличению максимального к.п.д. η_{\max} и максимальной степени сжатия $\varepsilon_{52\max}$. Например, при $\varepsilon_{12} = 121$ к.п.д. η_{\max} увеличивается от 0,2 до 0,58 (см. рис. 14), степень сжатия $\varepsilon_{52\max}$ увеличивается от 22 до 45,7 (см. рис. 13, 14). Причем с увеличением ε_{12} прирост к.п.д. ($\eta_{\max} - \eta_{\max}$) сначала увеличивается, а затем уменьшается.

3) Применение ДПУ наиболее эффективно при степенях снижения давления на сопловом устройстве $100 \leq \varepsilon_{12} < 140$. В этом диапазоне прирост к.п.д. оказывается наибольшим и составляет $(\eta_{\max} - \eta_{\max}) \approx 38\%$ (на рис. 14 область наибольшего прироста по к.п.д. выделена серым цветом).

Воздействовать на активный поток можно путем организации его импульсной подачи (рис. 15). Уравнения, описывающие двухрядную структуру потока в проточной части аппарата без трения, представлены формулами (10)-(13).

Формирование жидкого снаряда может осуществляться в свободном состоянии, либо целиком в стволе b (см. рис. 15). Для данного аппарата важнейшими параметрами являются степень сжатия ε_{52} , степень падения давления ε_{12} , коэффициент эжекции α и к.п.д. η . Вместе с ключевыми параметрами характерными для обычного эжектора, есть дополнительные параметры, отражающие его рабочий процесс, а именно, безразмерные время разгона $\theta_p = t_p \cdot U_\infty / L_0$ и время цикла $\theta_{\text{ц}} = t_{\text{ц}} \cdot U_\infty / L_0$, а также относительная длина ствола $\chi_c = L_c / L_0$. Базовыми величинами были приняты длина входного канала L_0 и скорость установившегося истечения жидкости из камеры 1 в камеру 2 $U_\infty = \sqrt{2 \cdot (p_1 - p_2) / \rho_{\text{ж}}}$.

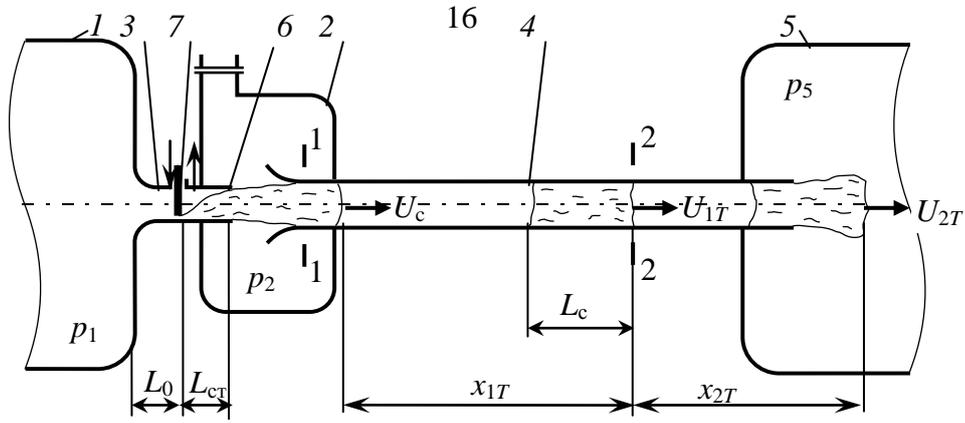


Рисунок 15. Принципиальная схема ЖГСН с прерывистой струей:
 1 – камера с высоконапорной жидкостью; 2 – камера всасывания; 3 – входной канал;
 4 – рабочая камера; 5 – напорная полость; 6 – ствол; 7 – прерыватель

$$\alpha = \left[\frac{(\psi_c + \psi_{2T}) \cdot \theta_{\text{ц}}}{2 \cdot \chi_c} - 1 \right] \cdot \frac{\varepsilon_{52} - 1}{\ln \varepsilon_{52}}; \quad (10)$$

$$\psi_{1T} = \frac{\psi_c + \psi_{2T}}{2} + \frac{\alpha \cdot \chi_c}{\theta_{\text{ц}}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{52} + 1}{\varepsilon_{52}} - \frac{2 \cdot \ln \varepsilon_{52}}{\varepsilon_{52} - 1} \right); \quad (11)$$

$$\theta_{\text{ц}} = \int_0^{1 - \frac{1}{\varepsilon_{52}}} \frac{\alpha \cdot \chi_c \cdot dz}{\sqrt{(\psi_c - \psi_{1T})^2 + \frac{\alpha}{(\varepsilon_{12} - 1)} \cdot ((\varepsilon_{52} + 1) \cdot z + 2 \cdot \ln(1 - z))}}; \quad (12)$$

$$\varepsilon_{12} = 1 + \frac{(\varepsilon_{52} - 1) \cdot \theta_{\text{ц}}}{2 \cdot \chi_c \cdot (\psi_c - \psi_{2T})}; \quad (13)$$

Здесь $\psi_c = U_c / U_{\infty}$ – относительная скорость снаряда; ψ_{1T} , ψ_{2T} – относительная скорость снаряда в конце первого и второго периода.

С помощью системы уравнений (14)-(17) были получены характеристики к.п.д. η аппарата в зависимости от степени сжатия ε_{52} и безразмерного времени открытия входного канала θ_p (рис. 16), а также график, показывающий влияние относительной скорости снаряда ψ_{2T} в конце второго периода и наличие ствола б на к.п.д. η аппарата (рис. 17).

Видно, что с увеличением безразмерного времени открытия входного канала θ_p достижимая без трения характеристика $\eta = f(\varepsilon_{52})$ улучшается. Импульсный ЖГСН будет работать экономичней, если формирование снарядов происходит в стволе, а скорость снаряда, покидающего рабочую камеру, близка к нулю. Можно ожидать, что увеличение числа снарядов, одновременно находящихся в рабочей камере, расширят область по ε_{52} эффективной работы импульсного ЖГСН.

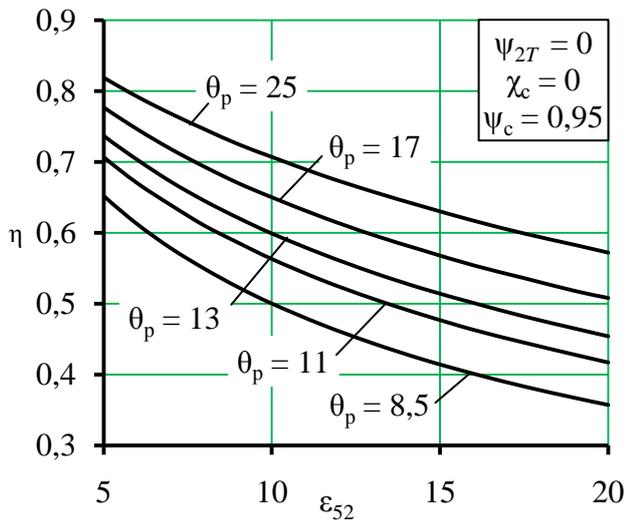


Рисунок 16. Зависимость к.п.д. импульсного ЖГСН от степени сжатия и безразмерного времени открытия входного канала при формировании снаряда полностью в стволе

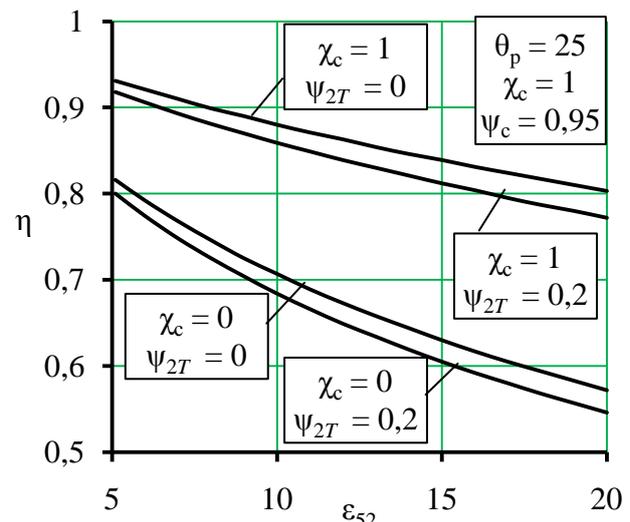


Рисунок 17. Влияние скорости второго снаряда в конце периода и наличие ствола на к.п.д. импульсного ЖГСН

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований и натурных испытаний, которые сопоставлены с теоретическими результатами, полученными на основе математической модели ЖГСН.

Экспериментальные исследования проводились на исследовательском комплексе со струйными насосами (рис. 18)

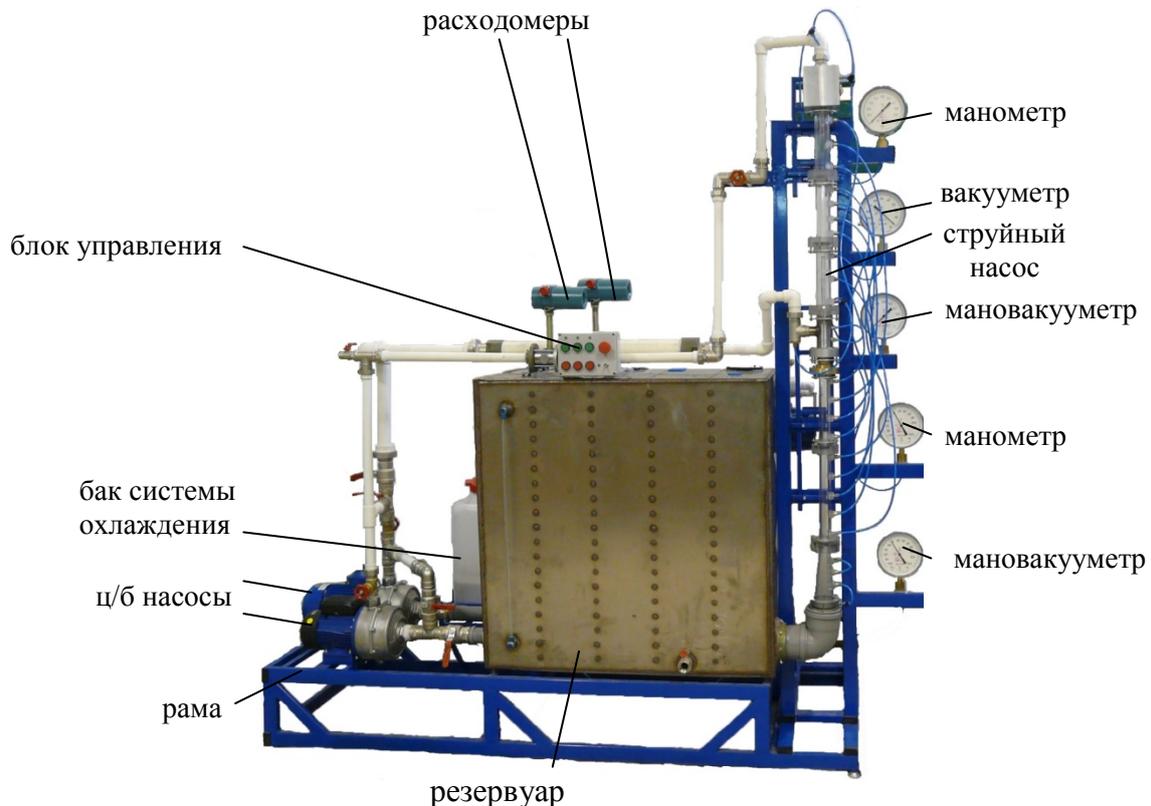


Рисунок 18. Исследовательский комплекс со струйными насосами (показан ЖГСН двухступенчатого варианта исполнения)

Как правило, лабораторные исследования заключались в снятии характеристики, выражающие зависимости давления всасывания p_2^I и промежуточного давления p_2^{II} от противодействия p_5 , при нескольких массовых расходах, увлекаемого из помещения, воздуха $m_{\text{возд}}$, объемных расходах воды, поступающих в

первую $Q_{ж}^I$ и вторую $Q_{ж}^II$ ступень, и давлениях питания первой p_1^I и второй ступени p_1^II .

Некоторые результаты лабораторных испытаний представлены на рис. 19, 20. Сплошными линиями показаны расчеты характеристик, выполненные на основе уравнений (1)-(6), а опытные точки – маркерами. Видно, что на расчетном режиме с ростом противодействия p_5 наблюдается линейное повышение давления всасывания p_2^I и промежуточного давления p_2^II . Сопоставление теоретических прямых и опытных данных показывает удовлетворительное совпадение. Статистическая обработка данных показала воспроизводимость опытов, адекватность предложенной математической модели и попадания теоретических данных в доверительный интервал погрешности измерений с вероятностью $\alpha = 0,95$. Отклонение опытных данных соответствует нерасчетным режимам работы ЖГСН, когда скачок перемешивания смещается из камеры смещения первой ступени в область расположения сопла питания второй ступени, что сопровождается резким провалом промежуточного давления p_2^II .

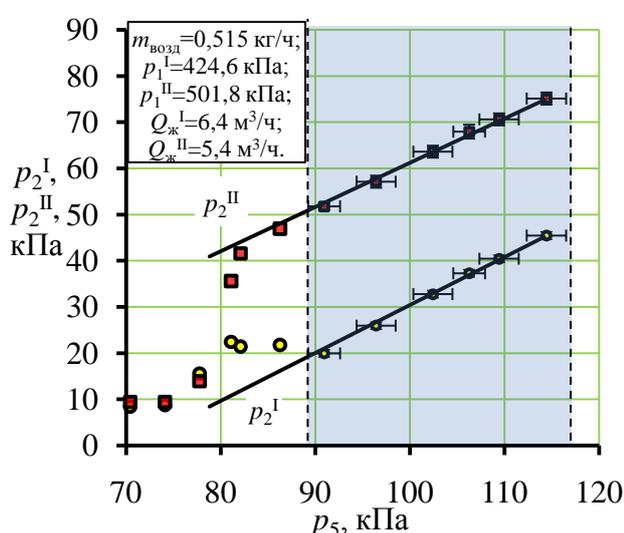


Рисунок 19. Зависимость давления всасывания и промежуточного давления от давления на выходе из установки ($d_{ш} = 1,0$ мм)

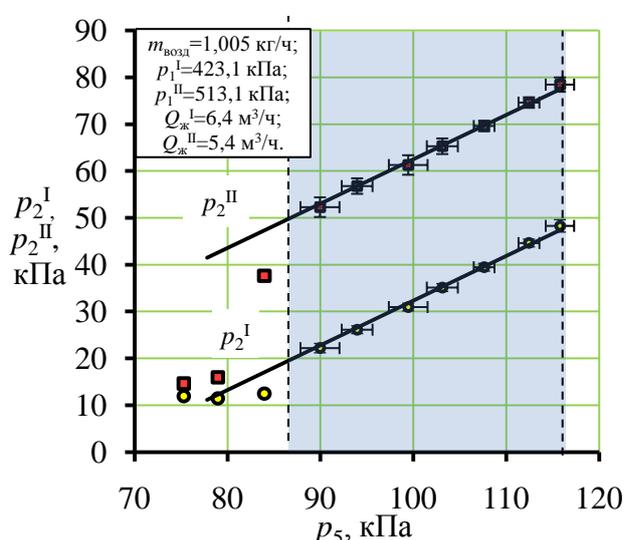


Рисунок 20. Зависимость давления всасывания и промежуточного давления от давления на выходе из установки ($d_{ш} = 1,4$ мм)

Также на Ириклинской ГРЭС были сняты характеристики двух основных многоканальных водовоздушных эжектора ЭВ-7-1000, которые представляют собой одноступенчатый вариант исполнения ЖГСН без диффузора. Были сняты характеристики выражающих зависимости давления всасывания p_2 от массового расхода воздуха $m_{возд}$ при постоянных значениях давления питания воды p_1 перед эжекторами, противодействии p_5 и расхода воды $Q_{ж}$ (рис. 21, 22). Сплошными линиями показаны расчеты характеристик, выполненные на основе уравнений (1), (2), а опытные точки – маркерами.

В связи с тем, что натурные испытания проводились на промышленном объекте, число испытаний было ограничено временем вывода испытываемого объекта из эксплуатации.

Анализ графиков показывает удовлетворительное совпадение теоретических прямых и опытных данных. При этом зависимость давления всасывания p_2 от массового расхода воздуха $m_{возд}$ имеет линейный характер и при увеличении последнего наблюдается рост давления всасывания p_2 .

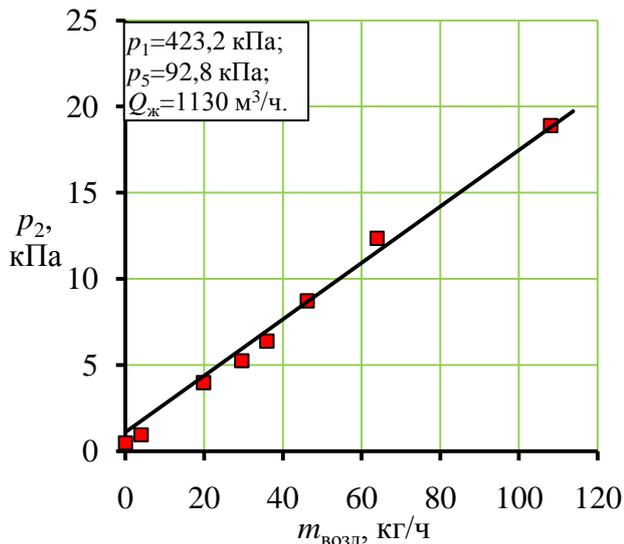


Рисунок 21. Зависимость давления всасывания от массового расхода воздуха эжектора ОЭ-А

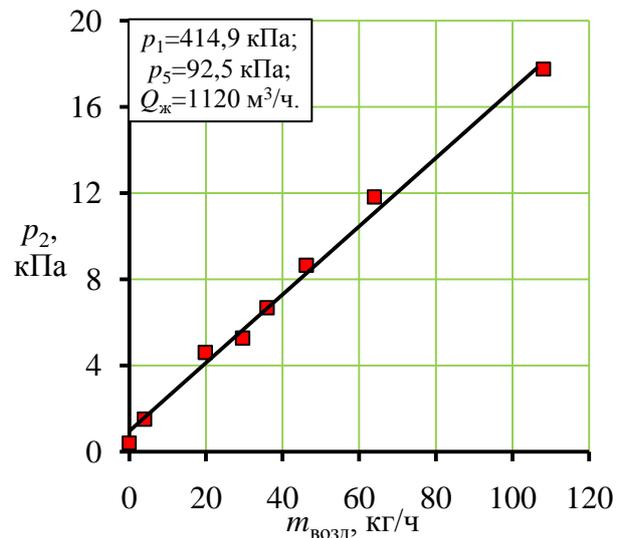


Рисунок 22. Зависимость давления всасывания от массового расхода воздуха эжектора ОЭ-Б

На Кармановской ГРЭС исследовался двухступенчатый ЖГСН с диффузором. Испытания заключались в снятии характеристики аппарата, показывающую зависимость промежуточного давления p_2^{II} , противодействия p_5 от давления всасывания p_2^{I} при различных массовых расходах воздуха m_r (рис. 23). В качестве соплового отверстия первой ступени использовался сопловой диск с пятью отверстиями $d_0^{\text{I}} = 38$ мм, при этом относительная площадь сопла первой ступени равнялась $\Omega_{03}^{\text{I}} = 0,11$. На второй ступени дополнительное сопло питания имело диаметр $d_0^{\text{II}} = 50$ мм, относительная площадь сопла была равна $\Omega_{03}^{\text{II}} = 0,15$; относительное сужение конфузора $\Omega_{\text{конф}} = 0,24$; относительное расширение диффузора $\Omega_{54}^{\text{II}} = 2,8$.

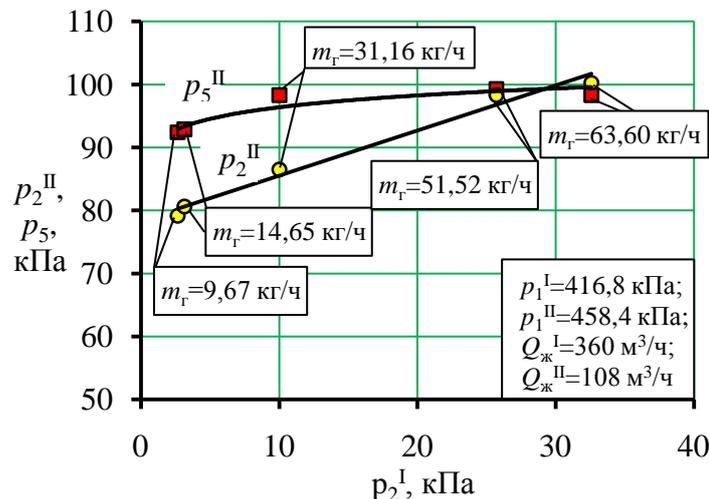


Рисунок 23. Зависимость промежуточного давления и противодействия от давления всасывания и массового расхода воздуха двухступенчатого СН

На рис. 23 сплошными линиями показаны расчеты характеристик, выполненные на основе уравнений (1)-(6), а опытные точки – маркерами. Анализ графика показывает удовлетворительное совпадение теоретических прямых и опытных данных. При этом с увеличением давления всасывания p_2^{I} и массового расхода воздуха m_r происходит увеличение промежуточного давления p_2^{II} и

противодавления p_5 . Такая зависимость подтверждалась экспериментальными исследованиями.

Как видно результаты лабораторных экспериментов, исследований промышленного и полупромышленного образца показывают удовлетворительное совпадение с теоретическими результатами, что подтверждает адекватность математической модели.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Существуют два основных направления повышения эффективности струйных аппаратов: совершенствование проточной части аппарата рациональным профилированием и выбором состава ее элементов, а также изменение рабочего процесса воздействием на активный и пассивный потоки до их смешения в рабочей камере.

2. Предложена обобщенная схема жидкостно-газового струйного насоса (ЖГСН), которая включает в себя комплекс мероприятий по обеспечению плавного повышения давления, что увеличивает эффективность работы аппарата.

3. Разработана математическая модель ЖГСН, позволяющая определять характеристики аппарата и оценивать вклад каждого его элемента в общую степень сжатия газа при различных режимах работы, а также оценить потенциальные возможности мероприятия по воздействию на пассивный поток.

4. Основными внешними параметрами работы ЖГСН являются массовый расход эжектируемого газа m_r , объемные расходы жидкости из сопел питания первой $Q_{ж}^I$ и второй $Q_{ж}^{II}$ ступени, давления питания первой p_1^I и второй p_1^{II} ступени, давление всасывания p_2^I и противодавление p_6 . При выполнении ЖГСН в двухступенчатом исполнении важным внутренним параметром, влияющим на эффективность его работы, является давление $p_4^I = p_2^{II}$ между ступенями. Для каждого режима работы ЖГСН существует предпочтительная величина давления p_4^I , при котором аппарат работает с минимальным потреблением рабочей среды. Так, при режимных параметрах $m_r = 90$ кг/ч, $p_1^I = p_1^{II} = 400$ кПа, $p_2^I = 3,5$ кПа, $p_5^{II} = 105$ кПа минимальный суммарный массовый расход жидкости $\sum m_{ж} = 636$ т/ч достигается при величине давления $p_4^I = 65$ кПа.

5. Важнейшими безразмерными параметрами ЖГСН являются степень сжатия $\varepsilon_{62}(\varepsilon_{52}, \varepsilon_{42})$, степень снижения давлений на сопловых устройствах ε_{12} , коэффициент эжекции α . На основе математической модели были получены безразмерные характеристики, показывающие вклад элементов проточной части ЖГСН в общую степень сжатия газа ε_{62} . Анализом характеристик показано, что основным параметром, определяющим рациональные структуру и состав ЖГСН является степень снижения давлений на сопловых устройствах ε_{12} . Для одноступенчатого исполнения ЖГСН можно указать степень снижения давления на сопловом устройстве ε_{12} , при которых применение диффузора и ВЦН для достижения заданной степени сжатия $\varepsilon_{62}(\varepsilon_{52}, \varepsilon_{42})$ не целесообразно. Например, при располагаемой степени снижения давления на сопловом устройстве $\varepsilon_{12} = 125$ и потребной степени сжатия $\varepsilon_{42}(\varepsilon_{52}, \varepsilon_{62}) < 16$ можно ограничиться применением одноступенчатого ЖГСН без диффузора для получения заданной степени сжатия $\varepsilon_{42}(\varepsilon_{52}, \varepsilon_{62})$, что позволит сделать аппарат более компактным.

Вместе с тем, существуют такие параметры работы ε_{62} , ε_{12} , при которых не целесообразно применение второй ступени.

6. Численным исследованием безразмерных характеристик ЖГСН выявлены режимы с наибольшими к.п.д. Совокупность этих режимов образуют предельные по к.п.д. характеристики аппарата, которые целесообразно использовать при расчете и проектировании ЖГСН.

7. Применение ЖГСН двухступенчатого исполнения при традиционном последовательном расположении элементов конструкции приводит к значительному увеличению осевых размеров и затрудняет размещение в ограниченных объемах. С целью устранения этого недостатка была предложена оригинальная конструкция, в которой вторая ступень расположена во внутренней полости первой ступени.

8. Предложена универсальная методика расчета и проектирования ЖГСН, которая состоит из трех этапов. На первом этапе определяется рациональная структура и состав ЖГСН; на втором – рассчитываются предпочтительные размеры проточной части аппарата; на третьем этапе рассчитываются характеристики ЖГСН, отражающих его работу при переменных условиях.

9. Численными исследованиями характеристик ЖГСН с непрерывной и прерывистой подачей активной жидкости доказано существенное повышение к.п.д. аппарата предварительным разгоном пассивного потока или импульсной подачей жидкости. Предварительный разгон эжектируемого газа позволяет уменьшать потери энергии на смешении потоков и увеличивать к.п.д. η аппарата. Однако для достижения высоких к.п.д. η требуются сравнительно высокие коэффициенты скольжения фаз ψ . Если обеспечить импульсную подачу жидкостного потока, то помимо сдвиговых сил возникнут силы давления, образующиеся при движении отсеков струи (снарядов) как жидких поршней, при этом эффективные режимы работы ЖГСН наблюдаются при одновременном нахождении в рабочей камере не менее двух снарядов.

10. Экспериментальные исследования и натурные испытания различных исполнений ЖГСН, статистическая обработка опытных данных и сопоставление их с теоретическими результатами, показали удовлетворительное совпадение результатов исследований, адекватность предложенной математической модели и возможность использования принятой расчетной модели струйного насоса в качестве основы инженерного расчета.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации опубликованы 9 печатных работ, из них: 2 – тезисы докладов; 3 – научных статьи; 3 – статьи в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК; 1 – учебно-методическое пособие.

Личный вклад автора заключается в следующем:

- разработка математической модели ЖГСН;
- численный расчет и анализ характеристик ЖГСН;
- разработка универсальной методики расчета и проектирования ЖГСН;
- экспериментальные исследования и статистическая обработка данных.

Список работ:*В изданиях, рекомендованных ВАК*

1. Спиридонов, Е.К. Пути оптимизации работы водовоздушного струйного вакуумного насоса в системах вакуумирования энергетических установок / Е.К. Спиридонов, А.Р. Исмагилов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2012. – Т. 14, №1 (2) – С. 689-692.

2. Спиридонов, Е.К. Об энерго- и ресурсосбережении при эксплуатации водовоздушных струйных насосов систем глубокого вакуумирования / Е.К. Спиридонов, А.Р. Исмагилов // Вестник ЮУрГУ. Серия "Машиностроение". - 2012. - Вып. 20. № 33 (292). - С. 13-20.

3. Исмагилов, А.Р. К вопросу энергоэффективности водовоздушного струйного насоса при использовании побудителя пассивного потока / А.Р. Исмагилов, Е.К. Спиридонов // Вестник УГАТУ. Серия "Машиностроение". - 2013. - Т. 17, № 4 (57). - С. 70-75.

В других изданиях

4. Исмагилов, А.Р. Сжатие газа жидкими снарядами / А.Р. Исмагилов, Е.К. Спиридонов // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика // Тез. докл. XII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. - М.: Издательский дом МЭИ, 2008. - С. 28.

5. Спиридонов, Е.К. Сжатие газа жидкими снарядами / Е.К. Спиридонов, А.Р. Исмагилов // Динамика машин и рабочих процессов: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции 8-10 декабря 2009 г. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. - С. 168-172.

6. Исмагилов, А.Р. О повышении эффективности эжекторной системы вакуумирования паротурбинных установок / А.Р. Исмагилов, Спиридонов Е.К. // Динамика машин и рабочих процессов: тезисы научно-технической конференции 10-12 апреля 2011 г, г. Челябинск. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – С. 11.

7. Исмагилов, А.Р. Результаты исследовательских испытаний на Ириклинской ГРЭС и возможные пути совершенствования системы вакуумирования паротурбинных установок / А.Р. Исмагилов // Научный поиск: материалы третьей научной конференции аспирантов и докторантов. технические науки. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – Т. 1. – С. 102-106.

8. Исмагилов, А.Р. Учебно-исследовательский комплекс «Струйные насосы» / А.Р. Исмагилов // Динамика машин и рабочих процессов: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – С. 106-110.

9. Спиридонов, Е.К. Струйные насосы: учебное пособие по выполнению лабораторных работ / Е.К. Спиридонов, А.Р. Исмагилов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 30 с.

Исмагилов Александр Рашидович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
ЖИДКОСТНО-ГАЗОВЫХ СТРУЙНЫХ НАСОСОВ

Специальность

05.04.13 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 21.10.2013. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 402/725.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76