|  |  |
| --- | --- |
| *voenmeh* | МИНОБРНАУКИ РОССИИ  федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  высшего образования  **«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**  **(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»)** |
| БГТУ.СМК-Ф-4.2-К5-01 |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Факультет |  | А |  | Ракетно-космической техники |
|  |  | шифр |  | наименование |
| Кафедра |  | А8 |  | Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов |
|  |  | шифр |  | наименование |
| Дисциплина |  | Двигатели двухсредных аппаратов | | |

РЕФЕРАТ

на тему

|  |
| --- |
| Применение кавитаторов |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Выполнил студент группы | | | |  |  |
|  | | | | | |
| Фамилия И.О. | | | | | |
| **РУКОВОДИТЕЛЬ** | | | | | |
|  | |  |  | | |
| Фамилия И.О. Подпись | | | | | |
| Оценка |  | | | |  |
| «\_\_\_\_\_» |  | | | | 201\_г. |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

201\_ г.

СОДЕРЖАНИЕ

[ВВЕДЕНИЕ 3](#_Toc533427695)

[1. Обзор влияния кавитации 4](#_Toc533427696)

[1.1 Положительные и отрицательные качества кавитации 7](#_Toc533427697)

[2. Обзор методов возникновения кавитации 12](#_Toc533427698)

[2.1 Магнитострикторы 13](#_Toc533427699)

[2.2 Кавитаторы типа ФЬЮСОНИК 13](#_Toc533427700)

[2.3 Лопастные кавитаторы 15](#_Toc533427701)

[2.4 Сирены гидродинамические 15](#_Toc533427702)

[3. Обзор патентов на конфигурацию кавитатора 19](#_Toc533427703)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 24](#_Toc533427704)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 25](#_Toc533427705)

# **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время в мире появилось множество устройств, позволяющих возбудить в жидкости процесс кавитации. Исследования показывают, что от величины кавитационной полости зависит скорость схлопывания пузырьков газа, а значит и степень воздействия на жидкость, находящуюся в зоне схлопывания. Процесс кавитации представляет собой нарушение сплошности жидкости, которое происходит в тех участках потока, где давление, понижаясь, достигает некоторого критического значения. Этот процесс сопровождается образованием большого числа пузырьков, наполненных преимущественно парами жидкости, а также газами, выделившимися из раствора. Находясь в области пониженного давления, пузырьки увеличиваются и превращаются в большие пузыри-каверны. Затем они уносятся потоком в область с давлением выше критического, где разрушаются практически бесследно вследствие конденсации заполняющего их пара. Таким образом, в потоке создается довольно четко ограниченная кавитационная зона, заполненная движущимися пузырьками.

Процесс кавитации подобен процессу закипания жидкости. Основное различие между ними заключено в том, что при закипании изменение фазового состояния жидкости происходит при среднем по объёму жидкости давлении равном давлению насыщенного пара, тогда как при кавитации среднее давление жидкости выше давления насыщенного пара, а падение давления носит локальный характер.

1. **Обзор влияния кавитации**

В настоящее время широко распространена теория о существовании в любом объеме реальной жидкости своего рода слабых мест или ядер кавитации, характерной особенностью которых является наличие в них нерастворившегося газа. Было сделано достаточно много предположений о возможном строении таких ядер кавитации. Интересная гипотеза была высказана в 1945 г. В соответствии с этой гипотезой ядра кавитации представляют собой твердые частицы гидрофобного вещества с трещинами, содержащими нерастворившийся газ. По мнению других авторов, ядрами кавитации являются мельчайшие пузырьки нерастворившегося газа, защищенные сферической оболочкой из органических веществ. Эта идея основана на предположении, что если в жидкости имеется даже очень малое количество органических примесей, то это должно повлечь за собой адсорбцию этих примесей на поверхности газового пузырька с образованием на ней органического мономолекулярного слоя. Наличие такого слоя существенно снижает силы поверхностного натяжения на границе взаимодействия жидкости и газа, препятствует диффузии газа в окружающую жидкость и обеспечивает пузырьку дополнительную прочность. Этот газ всегда содержится в жидкости, и при местном снижении давления начинает интенсивно выделяться внутрь кавитационных пузырьков.

Поскольку под воздействием переменного местного давления жидкости пузырьки могут резко сжиматься и расширяться, то температура газа внутри пузырьков колеблется в широких пределах, и может достигать нескольких сот градусов по Цельсию. Имеются расчётные данные, что температура внутри пузырьков может достигать 1500 градусов Цельсия. Следует также учитывать, что в растворённых в жидкости газах содержится больше кислорода в процентном отношении, чем в воздухе, поскольку максимум деаэрации приходится на минимум статического давления и максимум температуры в системе, Воздух, растворенный в воде содержит приблизительно 35,6 % кислорода по сравнению с 21% долей в обычном воздухе, и поэтому газы в пузырьках при кавитации химически более агрессивны, чем атмосферный воздух.

Образование кавитационной зоны хорошо демонстрируются на примере (рисунок 1) протекания жидкости через трубу с местным сужением (расходомер Вентури, сопло). Возрастание скорости течения в сжатом сечении обусловливает уменьшение статического давления на этом участке. Постепенное увеличение расхода жидкости приводит к тому, что при достаточно большой скорости течения давление в месте сужения падает до критического значения и возникает кавитация.

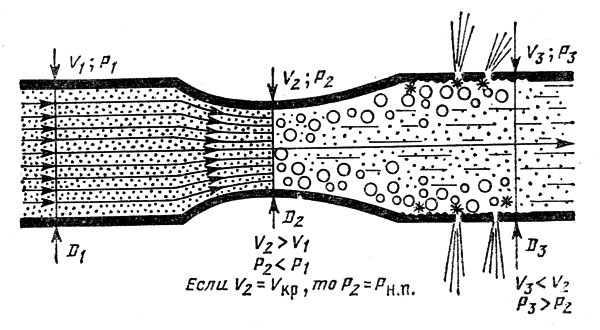


Рисунок 1 – Схема образования пузырьков газа при кавитации

Существует три группы факторов, виляющих на возникновение и последующие развитие кавитации:

* загрязнение жидкости, образующее ядра кавитации и определяющее их число;
* физические свойства жидкости;

гидродинамические характеристики потока.

Кавитационное течение характеризуют безразмерным параметром (числом кавитации):

Описание: Описание:  \Chi=\frac{2(P-P_s)}{\rho V^2} , где

Описание: Описание: P — гидростатическое давление набегающего потока, Па;

Описание: Описание: P_s — давление насыщенных паров жидкости при определенной температуре окружающей среды, Па;

Описание: Описание: \rho  — плотность среды, кг/м³;

Описание: Описание: V — скорость потока на входе в систему, м/с.

Известно, что кавитация возникает при достижении потоком граничной скорости Описание: Описание: V = V_c, когда давление в потоке становится равным давлению парообразования (насыщенных паров). Этой скорости соответствует граничное значение критерия кавитации.

В зависимости от величины Описание: Описание:  \Chi можно различать четыре вида потоков:

* докавитационный — сплошной (однофазный) поток при Описание: Описание:  \Chi>1,
* кавитационный — (двухфазный) поток при Описание: Описание:  \Chi\approx 1,
* пленочный — с устойчивым отделением кавитационной полости от остального сплошного потока (пленочная кавитация) при Описание: Описание:  \Chi<1,
* суперкавитационный — при Описание: Описание:  \Chi\ll 1.
  1. **Положительные и отрицательные качества кавитации**

Химическая агрессивность газов в пузырьках, имеющих к тому же высокую температуру, вызывает эрозию материалов, с которыми соприкасается жидкость, в которой развивается кавитация. Эта эрозия и составляет один из факторов вредного воздействия кавитации. Второй фактор обусловлен большими забросами давления, возникающими при схлопывании пузырьков и воздействующими на поверхности указанных материалов.

Первый фактор пагубно влияет на лопаточные гидромашины. Грибной винт, гидротурбина подвержены разрушению вследствие агрессивного воздействия схлопывания газовых пузырьков.

Когда схлопываются кавитационные пузыри, энергия жидкости сосредотачивается в очень небольших объемах. Тем самым, образуются места повышенной температуры и возникают ударные волны, которые являются источниками шума. Шум, создаваемый кавитацией, является особой проблемой на подводных лодках (субмаринах), так как из-за шума их могут обнаружить. При разрушении каверн освобождается много энергии, что может вызвать повреждения. Эксперименты показали, что вредному, разрушительному воздействию кавитации подвергаются даже химически инертные к кислороду вещества (золото, стекло и др.), хотя и намного более медленному. Это доказывает, что помимо фактора химической агрессивности газов, находящихся в пузырьках, важным является также фактор забросов давления, возникающих при схлопывании пузырьков. Кавитация ведёт к большому износу рабочих органов и может значительно сократить срок службы винта и насоса. В метрологии, при использовании ультразвуковых расходомеров, кавитационные пузыри модулируют волны, излучаемые расходомером, что приводит к искажению его показаний.

Комбинация волн давления и микроструй, находящихся с поверхностью взаимодействующего с жидкостью устройства разрушает его. Наиболее наглядными примерами пагубного влияния кавитации можно наблюдать на гребных винтах и рабочих колесах насосов (рисунок 2). Кавитация также является источником вредного воздействия шума и вибрации, которое приводит к снижению эффективности регулирования или приводят к полной утрате контроля над устройством.



Рисунок 2 – Рабочее колесо центробежного насоса

В лопастных насосах развитая кавитация приводит к резкому падению напора и коэффициента полезного действия. Вторым отрицательным последствием является – эрозия рабочих деталей насоса. Причина эрозионного разрушения является местные гидравлические удары, которые возникают при исчезновении кавитационных каверн. Длительное воздействие такой эрозии вызывает разрушение рабочих органов устройств. Гидравличекий удар может быть изображен как показано на рисунке 3.

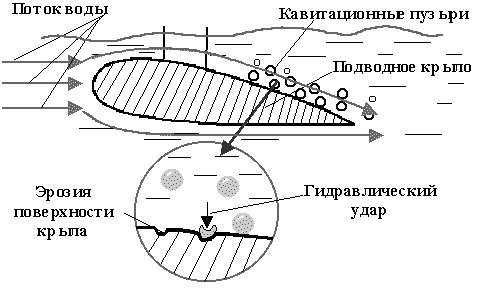


Рисунок 3 – Схема образования гидроудара при обтекании подводного крыла

Кавитация также является причиной возникновения низкочастотных колебаний жидкости – это одно из самых опасных проявлений кавитации в лопастном насосе. Падение давления в проточной части насоса в основном связано с обтеканием кромок лопастей. При положительном угле атаки потока на тыльной стороне лопасти существует область разряжения. С уменьшением давления на входе — это разряжение увеличивается. При определенном давлении, величина минимального давления у лопасти достигает значения упругости насыщенных паров жидкости. Уменьшение давления на входе в насос влечет к росту размеров кавитационной каверны. Для работы насоса в режиме безкавитационного срыва необходимо чтобы полна располагаемая энергия давления жидкости на входе в насос была больше энергии, при котором наступает кавитационное падение напора.

Положительные свойства кавитации нашли применение в промышленности граничные условия кавитации могут уничтожить загрязняющие вещества и органические молекулы. Спектральный анализ света, испускаемого в результате сонохимической реакции, показывает химические и плазменные базовые механизмы энергетической передачи. Свет, испускаемый кавитационными пузырями, называется сонолюминесценцией. Кавитационные процессы имеют высокую разрушительную силу, которую используют для дробления твердых веществ, которые находятся в жидкости. Одним из применений таких процессов является измельчение твердых включений в тяжёлые топлива, что используется для обработки котельного топлива с целью увеличения калорийности его горения.

В промышленности кавитация часто используется для гомогенизации (смешивания) и отсадки взвешенных частиц в коллоидном жидкостном составе, например, смеси красок или молоке. Многие промышленные смесители основаны на этом принципе. Обычно это достигается благодаря конструкции гидротурбин или путём пропускания смеси через кольцевидное отверстие, которое имеет узкий вход и значительно больший по размеру выход: вынужденное уменьшение давления приводит к кавитации, поскольку жидкость стремится в сторону большего объёма. Этот метод может управляться гидравлическими устройствами, которые контролируют размер входного отверстия, что позволяет регулировать процесс работы в различных средах. Внешняя сторона смесительных клапанов, по которой кавитационные пузыри перемещаются в противоположную сторону, чтобы вызвать имплозию (внутренний взрыв), подвергается огромному давлению и часто выполняется из сверхпрочных или жестких материалов, например, из нержавеющей стали, стеллита или даже поликристаллического алмаза.

Наибольший интерес вызывает использование кавитационного эффекта в высокоскоростных ракета-торпедах. Примером такой ракета-торпеды является ВА-111 «Шквал» (рисунок 4), который разработан под руководством академика АН УССР Г. В. Логвиновича - директора Института гидромеханики АН УССР. Кавитатор, установленный в носовой части ракета-торпеды, создает большие кавитационные пузыри, которые обволакивают корпус ВА-111 по ходу движения. Существенно уменьшая контакт с водой, такой механизм представляет значительное преимущество в качестве скорости движения под водой 375 км/ч.

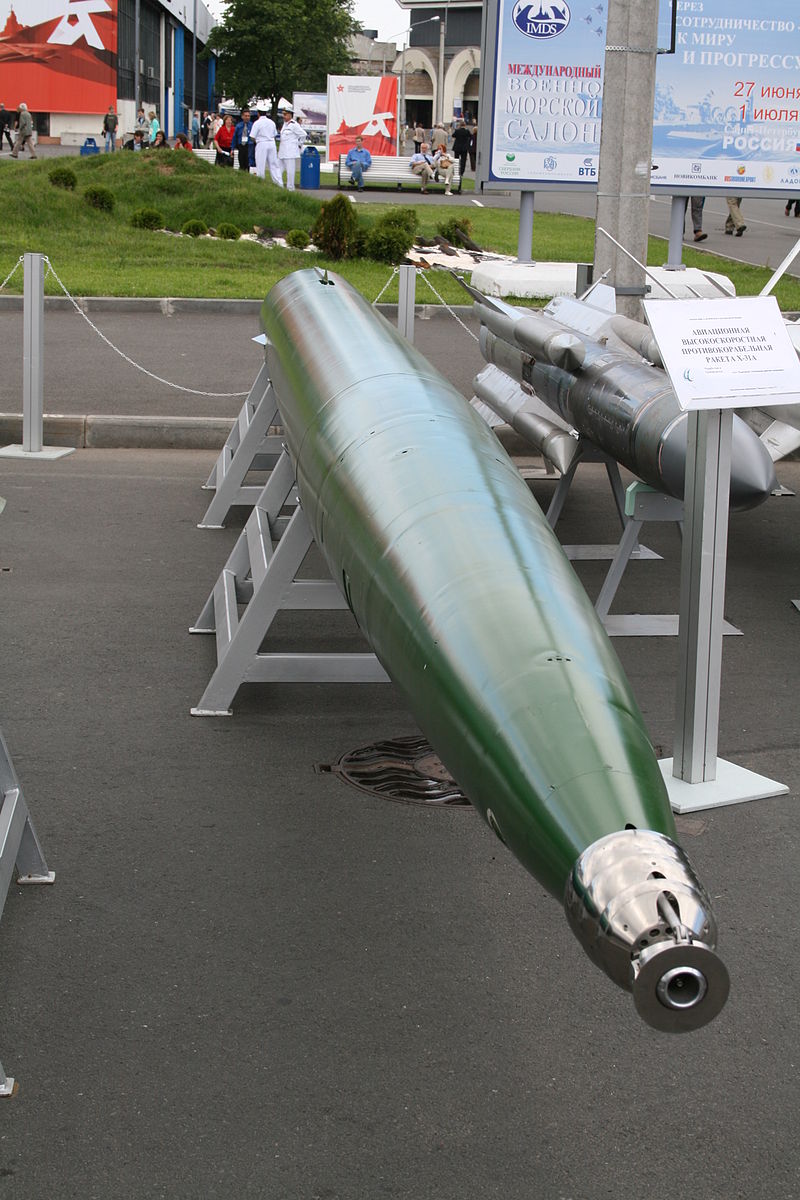


Рисунок 4 – Ракета-торпеда «Шквал»

Принцип работы скоростного движения ракета-торпеды «шквал» заключается в том, что жидкость не успевает сомкнуться вокруг корпуса, образуются каверны. В этом облаке каверн корпус ракета-торпеды отделяется от воды. Сопротивление жидкости при этом становится минимальным. Ракета-торпеда соприкасается с водой только через кавитатор – головную часть, сконструированную особым образом. За счет освободившейся энергии, ранее необходимой на преодоление сопротивления в жидкости, скорость ракеты-торпеды резко возрастает.

1. **Обзор методов возникновения кавитации**

В настоящее время в мире появилось множество устройств, позволяющих возбудить в жидкости процесс кавитации (образования полостей с отрицательным давлением). Практика показывает, что от величины кавитационной полости зависит скорость схлопывания, а значит и степень воздействия на жидкости, находящиеся в зоне схлопывания. Способов возбуждения кавитации в жидкостях всего четыре.

* С помощью ультразвуковых колебаний мембраны магнитостриктора. В зоне разряжения волны, образующейся от колебания мембраны тоже происходит образование кавитационных процессов;
* С помощью проточных труб с переменным сечением или специальными камерами завихрения (фьюсоник). Принцип таков, что при резком падении давления на границе перехода образуются кавитационные полости;
* С помощью вращения в протекающем потоке ротора (крыльчатки) определенного профиля;
* С помощью резкого разрыва потока жидкости механическим путем.

## **2.1 Магнитострикторы**

Самым дорогостоящим и малопроизводительным является магнитостриктор из-за очень дорогостоящей электронно-силовой части, возбуждающей мембрану. В Японии и Швейцарии такие приборы применяют в фармацевтическом и парфюмерно-косметическом производстве. Стоимость таких устройств, с производительностью до 0,5 м3/час, может доходить до 2 000 000 Евро. Но при малой производительности и высокой стоимости такие устройства и малонадежны, и дороги в эксплуатации и ремонте.

## **2.2 Кавитаторы типа ФЬЮСОНИК**

Такой аппарат представляет собой трубу переменного сечения, без движущихся частей, без двигателя и электроники. Такие аппараты производят наиболее слабое воздействие на обрабатываемую жидкость, за счет того, что:

* кавитация возникает не во всем объеме, жидкости невозможность постоянного поддержания оптимального режима работы;
* в зависимости от температуры, давления, вязкости и др. физико-химических параметров обрабатываемой жидкости добиться наиболее полного разрежения потока практически невозможно возможен эффект налипания мазута, что резко сказывается на качества и производительности требуется многократная обработка одного и того же объема жидкости для того, чтобы добиться более-менее однородной эмульсии;
* большая дисперсность ВМЭ - 10 микрон.

Эти недостатки не компенсируются такими преимуществами как:

* не содержит быстро изнашиваемых деталей, сальников, узлов вращения, не требуют обслуживания;
* не критичны к температуре и выдерживают большое давление мазута и высокую температуру (до 20 атм. и до 150 град);
* более дешевые в изготовлении.

Устройство кавитатора типа Фьюсоник изображено на рисунке 5.

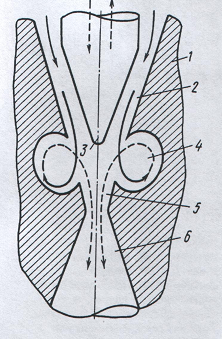


Рисунок 5 - Устройство кавитатора типа Фьюсоник

## **2.3 Лопастные кавитаторы**

Представляют собой трубу в которой протекает жидкость, в жидкости вращается крыльчатка определенного профиля. Кавитация возникает за счет разрежения потока за лопастью. Кавитация более интенсивная по сравнению с кавитаторами типа ФЬЮСОНИК за счет многократности возникновения кавитации в единице объема. Добиться наиболее полного разрежения потока практически невозможно. Кавитация возникает не во всем объеме, жидкости. Схема лопастного кавитатора изображена на рисунке 6.

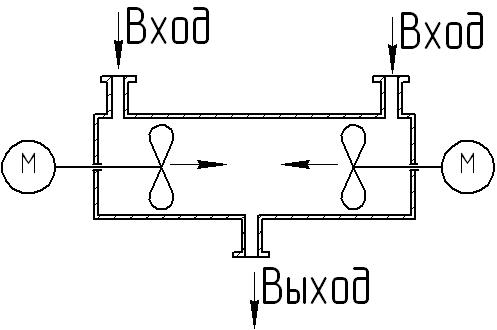


Рисунок 6 – Схема лопастного кавитатора

## **2.4 Сирены гидродинамические**

Представляют собой корпус с установленными в нем входным и выходным патрубками, в корпусе установлены концентрические ротор и статор с выполненными в них окнами. За счет того, что окна в статоре периодически открываются и закрываются происходит периодическое прерывание ВСЕГО потока жидкости, количество и размер окон подобраны таким образом, что происходит обработка всей жидкости (рисунок 7).

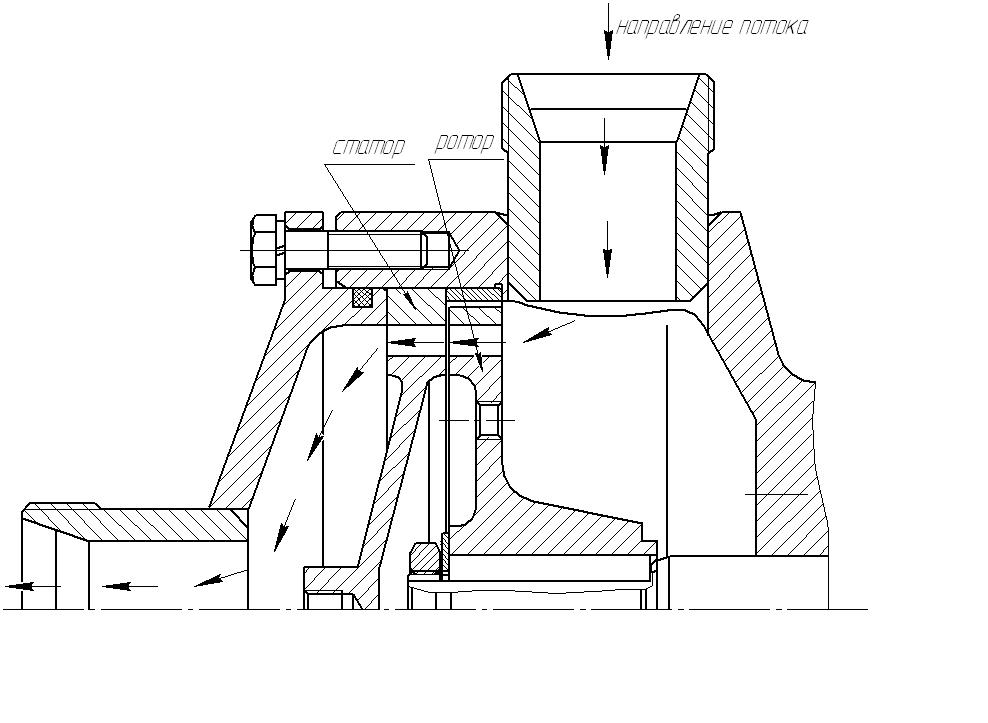


Рисунок 7 – Схема сирены гидродинамической

Поток жидкости при обработке проходит через вращающийся ротор и неподвижный статор установки. Ротор, выполняет роль затвора, периодически прерывая поток, чем меньше зазор между ротором и статором, тем более герметичен затвор, интенсивнее обработка.

Основные процессы происходят в статоре. Рассмотрим на примере рисунка 8.

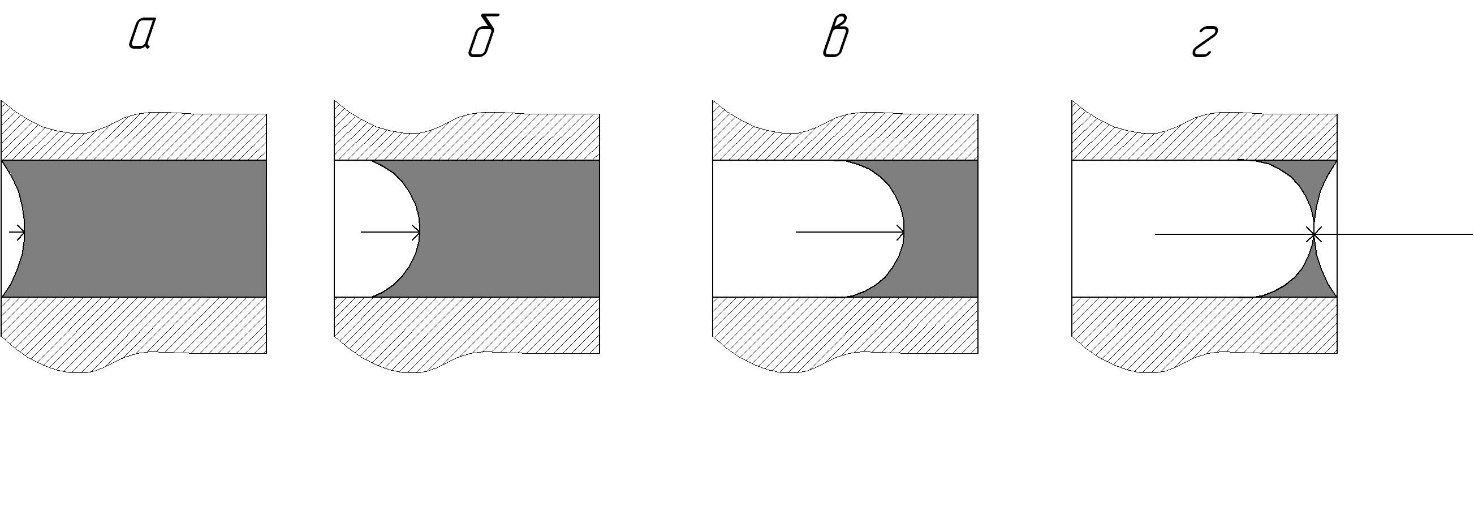


Рисунок 8 – Этапы перекрытия полостей

При совпадении окон ротора и статора поток движется через них с определенной скоростью. Скорость зависит от начального давления перед ротором (давления насоса).

При перекрытии ротором окна статора. Происходит резкий разрыв потока. Но т.к. жидкость обладает массой то она не останавливается мгновенно, она продолжает свое движение растягиваясь. За счет этого снижается давление внутри ее. Происходит вскипание растворенных внутри жидкости газов и образование т.н. кавитационной полости. В определенный момент силы инерции жидкости сравниваются с результирующей силой атмосферного давления и силой разряжения внутри кавитационной полости

За точкой равновесия начинает происходить следующие процессы:

Сила инерции уменьшается до 0 (за счет торможения жидкости разрежением в кавитационной полости) и т.к. нет дополнительного подпора, то отрицательное давление внутри полости начинает превышать результирующую силу и происходит процесс схлопывания кавитационной полости (пузыря). Т.к. жидкость плохо сжимается и плохо растягивается, то при прекращении действия внешних сил (сил инерции), процесс схлопывания происходит очень интенсивно.

. В момент завершения процесса схлопывания кавитационной полости происходит очередное совпадение окон ротора и статора и в полость ротора поступает очередная порция жидкости, тем самым в некоторой степени увеличивая скорость схлопывания. Дополнительно, в момент окончательного закрытия кавитационной полости встречаются 2 фронта жидкости: фронт схлопывания кавитационной полости и фронт движущейся жидкости, происходит гидроудар, дополнительно усиливающий интенсивность обработки.

а,б,в – схлопывание кавитационной полости рост скорости потока, г - гидроудар.

Основные факторы при разрушениях в результате кавитации. Степень повреждения в результате кавитации определяется следующими факторами:

1. Интенсивность кавитации. Чем больше разность давлений, тем выше вероятнее образование кавитации.
2. Материалы. Твердые материалы менее подвержены повреждениям.
3. Продолжительность воздействия кавитации. Чем чаще кавитация возникает на одной и той же поверхности, тем более вероятна она будет подвержена разрушениям.

Примерами снижения воздействия от кавитации рассмотрим на примере работы дросселирующего клапана. Повреждения в результате кавитации могут быть снижены путем использования некоторых технических решений, таких как:

1. Втулки клапана. Использование более тверды материалов и использование дополнительных сборочных единиц с целью уменьшения влияния кавитации на корпус клапана.
2. Ступенчатое дросселирование. Такой метод удерживает давление от падения давления ниже давления насыщенного пара и предотвращает возникновение пузырьков пара. Падение давления происходит ступенчато посредствам использования расширяющихся форсунок или расширяющихся проточных частей (рисунок 9). Ограничение изменения давления на каждой ступени, что предотвращает падение давление жидкости до точки парообразования.

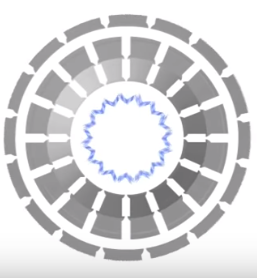


Рисунок 9 – Использование большого количества расширяющихся форсунок

# **Обзор патентов на конфигурацию кавитатора**

Достаточно интересным примером полезной модели кавитатора является патент US7966936. Данный патент описывает конфигурацию высокоскоростного подводного снаряда, включающего в себя телескопический механизм, который способен изменить форму носа снаряда. Такое изменение носа снаряда приводит к возникновению кавитации и созданию сопутствующей парообразной полости в воде, что снижает сопротивление движения снаряда.

Нос снаряда предназначен для размещения цилиндрического поршня кавитатора, который выдвигается по ходу движения под водой.

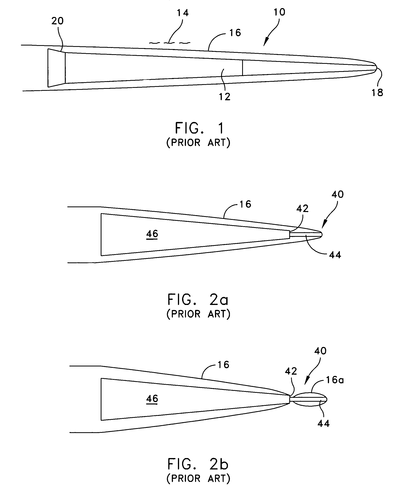
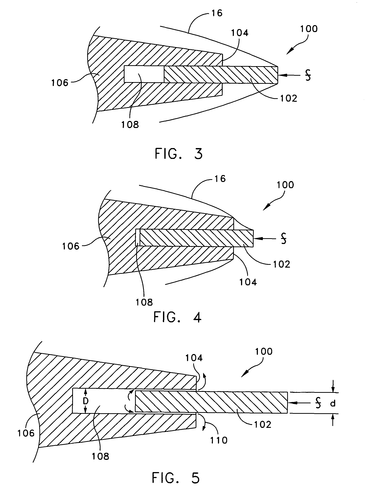


Рисунок 10 - Схемы патента US7966936

Еще одним примером является патент CN104828884, принадлежащий INSTITUTE OF ENGINEERING THERMOPHYSICS CHINESE ACADEMY OF SCIENCES. Изобретение является многослойным «вложенным» кавитатором. Он включает в себя входную секцию, используемую в качестве полости для распределения потока, и через которую жидкость входит в пространство различных слоев вложенного кавитатора. Секция вложенной трубки, состоящей из двух или более трубок Вентури, используется для создания необходимого условия давления для создании кавитации. Вторая часть кавитататора – выпускная секция, через которую жидкость из различных слоев кавитатора собирается и вытекает из него. Многослойный вложенный кавитатор способен эффективно расширять диапазон действия кавитации.

Результаты численного моделирования показывают, что по сравнению с одним кавитатором Вентури средняя задержка газа увеличивается более чем на 5%, а общий объем газа в зоне кавитации увеличивается более чем на 16% при одинаковом перепаде расхода и давления.

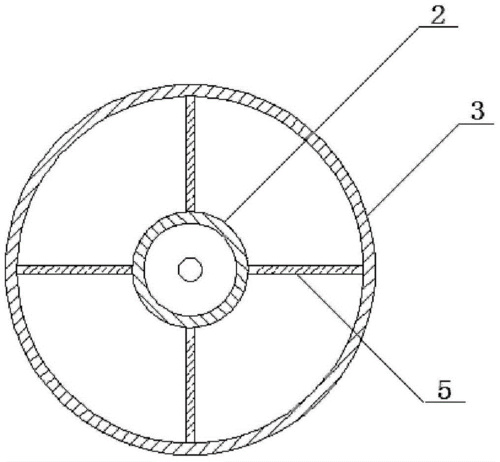
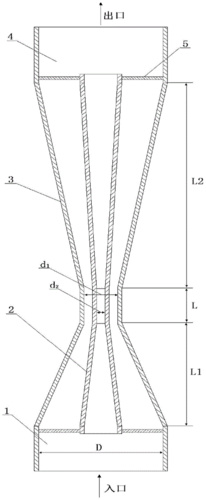


Рисунок 11 - Схемы патента CN104828884

Еще одним примером является патент CN107310687, принадлежащий BEIJING MECHANICAL EQUIPMENT INSTITUTE.

Изобретение описывает резистивный самоадаптируемый переменный структурный кавитатор. Конструкции кавитатора содержит коническую часть, подвижную часть и упругую часть. Коническая часть кавитатора содержит коническую головную часть и цилиндрическую хвостовую часть. Цилиндрическая хвостовая часть соединена с нижней поверхностью конической головной части. Эластичная часть расположена в цилиндрической хвостовой части и расположена на конце, вдали от конической головной части, цилиндрической хвостовой части. Подвижная часть охватывает внешнюю сторону конического кавитатора в режиме намотки и может скользить по цилиндрической хвостовой части. Самонастраивающийся конструкционный кавитатор с изменяющимся сопротивлением оказывает благотворное влияние на то, что при различных скоростях и глубинах судна летательный аппарат регулирует сопротивление посредством сопротивления, размер кавитации поддерживается эффективно, напряжение летательного аппарата стабильно; уменьшается влияние изменения числа кавитации на сопротивление, а диапазон колебаний сопротивления летательного аппарата уменьшается; и когда воздушное судно ограничено воздействием проникновения воды, структура изменяется с помощью упругих материалов, уменьшается сила удара проникновения воды и повышается безопасность входа воды.

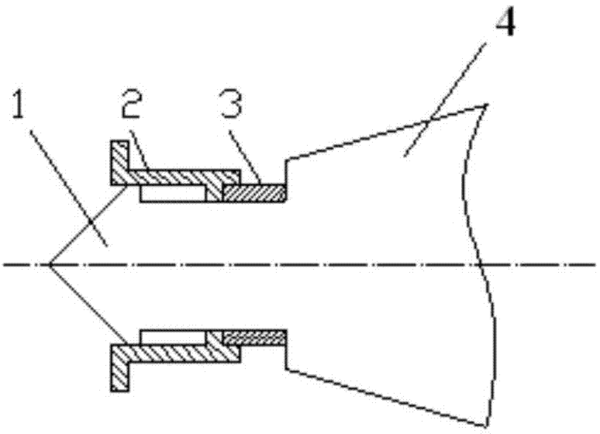


Рисунок 12 - Схемы патента CN107310687

Еще одним примером является патент KR101903269, принадлежащий KOREAN AGENCY FOR DEFENSE DEVELOPMENT.

Система привода кавитатора (10) суперкавитирующего подводного транспортного средства (1) в соответствии с настоящим изобретением включает в себя устройство (20) для генерирования полости, генерирующее полость, соединительное устройство (30-1,30-2), соединенное с генерацией полости. устройство (20) и вращение устройства (20), создающего полость, путем блокировки движения с изменением хода приводного устройства (50) и устройства (40) водонепроницаемости, соединяющего соединительное устройство (30-1,30-2) и приводное устройство (50) и блокирование протекания воды в корпус суперкавитирующего подводного транспортного средства (1), содержащего соединительное устройство (30-1,30-2). Водонепроницаемость поддерживается от притока воды даже в состоянии внешнего воздействия суперкавитирующего подводного транспортного средства (1) с помощью соединительного устройства (30-1,30-2).

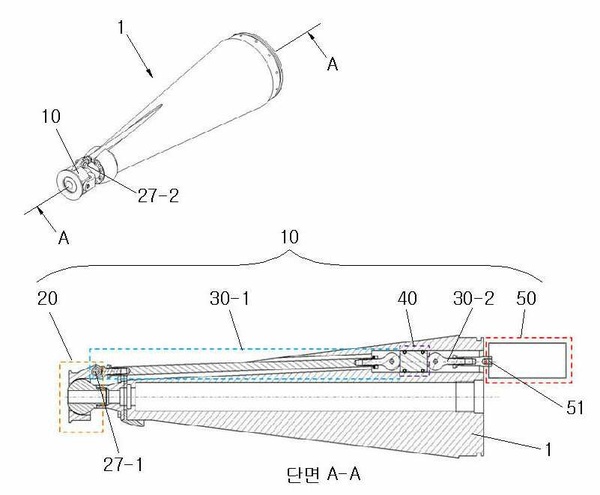


Рисунок 13 - - Схемы патента KR101903269

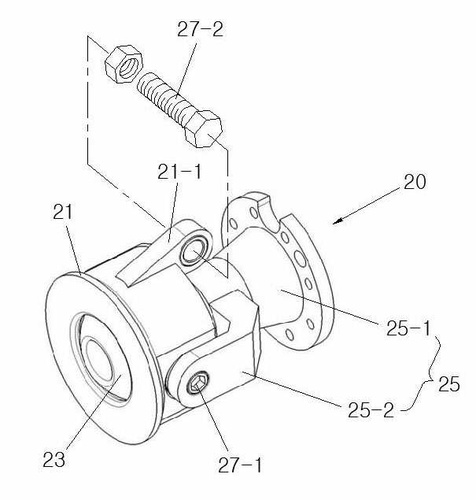


Рисунок 14 – Схема патента KR101903269

# **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Кавитация встречается в различных отраслях промышленности и несет в себе как полезные, так и вредные качества.  На работу насосов перекачивающих станций кавитация является одной из самых главных проблем, ведущих к потере работоспособности устройств и агрегатов. Таким образом на лопаточные машины кавитация влияет худущим образом – ведет к разрушению по средствам гидроударов и воздействием повышенной температуры.

С положительным эффектом от кавитации успешно работают ракета-торпеды «Шквал». Для работы ракета-торпед не важна длительность работы в облаке пара с точки зрения разрушающего фактора для корпуса. Для ракета-торпед самым главным и качественным фактором является возможность сверхбыстрого движения в плотной среде. Движение в облаке пара, что снизило сопротивление воды, в совокупности с гидрореагирующим топливом реактивного двигателя, который вырабатывает большую тягу, являются преимущественными и непреодолимыми для мировых конкурентов. Комплекс ВА-111 «Шквал» до сих пор находится на вооружении ВС РФ и является лучшим среди существующих подобных видов вооружения.

# **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Руднев С.С., Панаиотти С.С. Влияние газосодержания жидкости на кавитационные характеристики., - «Труды ВНИИГидромаша», 1968, вып 38, с 3-17.
2. Карелин В.Я., Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах.[текст] - М.: «МАШИНОСТРОЕНИЕ», 1975. - 336 с.
3. Рой Н.А. «Возникновение и протекание ультразвуковой кавитации.». Акустический журнал. 1957, т. 3, №1 с. 3-18
4. Шмель В.Б. Оптимальные параметры определяющие кавитационные качества центробежных насосов.- «Труды ВИГМа»: , 1958.- вып. XXII, с. 3-48.
5. Михайлов А.К., Малюшеноко В.В. Лопастные насосы.[текст] Теория расчет и конструирование. - М.: «МАШИНОСТРОЕНИЕ», 1977. - 325 с.