

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Теплотехника и гидрогазодинамика

кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

В.А. Кулагин

подпись

«___» _____ 20__г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

код – наименование направления

Определение режима работы и производительности

кавитационного конденсатора

Руководитель

подпись, дата

к.т.н., доцент каф. ТТиГД

должность, ученая степень

А.Ю. Радзюк

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

И.В. Белов

инициалы, фамилия

Красноярск 2023

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Определение режима работы и производительности кавитационного конденсатора» содержит 53 страницы текстового документа, 20 иллюстраций, 5 таблиц, 14 использованных источников.

КАВИТАЦИОННЫЙ УЧАСТОК, СТРУЙНЫЙ КОНДЕНСАТОР, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, СТЕНД, КАВИТАЦИЯ, ТЕМПЕРАТУРА, ТЕПЛООБМЕННИК

Целью данной работы является исследование возможности использования процессов кавитации для конденсации пара.

Для раскрытия данной цели, были поставлены ряд основных задач:

- рассмотреть струйные конденсаторы для определения принципа работы кавитационного конденсатора;
- проведение экспериментов по определению эффективности использования кавитационных процессов для конденсации.

В результате проведения опытов был рассмотрен принцип работы кавитационного конденсатора, выявлены факторы снижающие его производительность.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Обзор	7
1.1 Полезное применение кавитации	7
1.2 Смешивающие конденсаторы.....	9
2 Экспериментальная установка.....	21
2.1 Основное оборудование	22
2.1.1 Кавитационный участок.....	22
2.1.2 Насос ЛМ 65-20/25.....	24
2.1.3 Счетчик воды ВСХНд 100	26
2.1.4 Сепаратор воздуха и шлама СВШ-100	28
2.2 Вспомогательное оборудование.....	30
2.2.1 Манометр	30
2.2.2 Мановакуумметры	32
2.2.3 Нагреватель воды.....	33
2.2.4 Вакуумметр.....	34
2.2.5 Пирометр.....	36
2.2.6 Аппаратная часть для измерения скорости в LabVIEW	38
3 Подготовка и принцип работы экспериментальной установки	39
4 Проведение эксперимента по определению режимов работы и производительности кавитационного конденсатора.....	42
Заключение	51
Список использованных источников	52

Введение

При движении тела в капельной жидкости с большой скоростью, в большинстве случаев, возникает кавитация. По классификации, предложенной Блейком и принятой на симпозиуме в Лондоне в 1955 г. [1], механизм возникновения кавитации трактуется или как инерционное развитие пузырьков, или как диффузия растворенного газа в ядре кавитации из текущей жидкости или из трещин, имеющих на поверхности тела (гипотеза Корнфельда-Суворова [2, 3]).

Кавитация – это нарушение сплошности жидкости, которое происходит в тех участках потока, где давление понижается до давления насыщенных паров. Этот процесс сопровождается образованием большого числа полостей или пузырьков, заполненных в основном парами жидкости, а также газами. В зависимости от соотношения пара и газа в пузырьках они могут быть паровыми или газовыми. Находясь в зоне пониженного давления, пузырьки увеличиваются и превращаются в большие пузыри-каверны. Далее 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 ограниченный кавитационный участок, заполненный движущимися пузырьками [4].

Образование кавитационного участка наиболее хорошо демонстрируется при протекании жидкости через трубу с местным сужением – сопло Вентури. Данный метод был использован при создании экспериментальной установки, представленной на рисунке 5.

Физический процесс кавитации схож с процессом закипания жидкости. Основное различие между этими процессами заключается 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.

Самым основным механизмом возникновения процесса кавитации является образование пузырьков в зонах разряжения, которые возникают за счет быстрого движения жидкости. Гидродинамическая кавитация – это явление, при котором в жидкости образуются пузырьки газа, которые затем быстро расширяются и схлопываются под действием давления. Это может привести к разрушению поверхностей и другим повреждениям оборудования, работающего с жидкостями. Однако, достаточно интенсивная кавитация может использоваться для определенных технологических процессов, таких как смешивание, очистка и усиление реакций во многих отраслях промышленности. Этот процесс может приводить к механическим повреждениям, таким как коррозия, износ и прочность материала [5].

Гидродинамическая кавитация имеет локальное воздействие и происходит только там, где есть сопутствующие условия. Исследования показали, что большую роль в возникновении пузырьков при гидродинамической кавитации играют газы, которые выделяются внутри образующихся пузырьков (паровая кавитация), или как диффузия растворенного газа в ядре кавитации (газовая кавитация) из текущей жидкости или из трещин, имеющих на поверхности тела. Эти газы носят название свободные газы и все время находятся в жидкости, и при местном снижении давления происходит интенсивное выделение газов внутри указанных пузырьков.

Также существует другой механизм возникновения кавитации – при помощи акустических волн. Акустическая кавитация - это явление, при котором высокочастотные акустические волны вызывают образование пузырьков газа в жидкости. Эти пузырьки быстро расширяются и схлопываются под воздействием различных сил, таких как давление и турбулентность, что приводит к выделению большого количества энергии. Акустическая кавитация может использоваться в медицине для диагностики и лечения различных заболеваний, таких как литотрипсия для разрушения

камней в почках, а также в промышленности для очистки поверхностей, смешивания, усиления реакций и других технологических процессов.

Концентрация растворенных газов, в частности воздуха, может изменяться из-за перемещения отдельных объемов жидкости относительно друг друга или за счет диффузионных процессов переноса вещества из одних микрообъемов жидкости в другой [6]. Для того, чтобы растворить мелкие зародыши пузырьков, используются ресорберы, которые устанавливаются в кавитационные трубы [7].

Химическая агрессивность газов в пузырьках, имеющих к тому же высокую температуру, вызывает эрозию металлов, с которыми соприкасается жидкость, в которой развивается кавитация. Эта эрозия и составляет один из факторов вредного воздействия кавитации.

Основные места возникновения кавитации – насосы, винты. Так как лопасти гидротурбины (в насосах) вращаются в жидкости, то возникают области низкого давления, поскольку вокруг лопастей жидкость ускоряется и следует за ними. Чем быстрее будут вращаться лопасти, тем ниже может оказаться давление между ними. Таким образом, достигается давление насыщенного пара, жидкость испаряется и образует небольшие пузыри газа. После разрушения пузырей образуется сильная ударная волна, которая приводит к шуму и повреждает лопасти.

1 Обзор

1.1 Полезное применение кавитации

В настоящее время кавитационные технологии получили широкое внедрение во многих технологических процессах химических, нефтегазоперерабатывающей промышленности, криогенной технике. Известно, что химические и физические эффекты вызываемые пульсациями и схлопыванием кавитационных пузырей могут существенно повысить эффективность очистки поверхностей, смешение жидкостей и т.п. Существуют различные методы получения кавитационных процессов (гидродинамическая кавитация, ультразвуковая и т.п.).

Кавитация используется при ультразвуковой очистке поверхностей твёрдых тел. Специальные устройства создают кавитацию, используя звуковые волны в жидкости. Кавитационные пузыри, схлопываясь, порождают ударные волны, которые разрушают частицы загрязнений или отделяют их от поверхности. Таким образом, снижается потребность в опасных и вредных для здоровья чистящих веществах во многих промышленных и коммерческих процессах, где требуется очистка как этап производства.

Суперкавитирующие гидродинамические устройства по принципу работы разделяются на: статические – с неподвижными рабочими органами; динамические – с подвижными рабочими органами, в большинстве случаев лопастными; струйные – со струйными кавитаторами; комбинированные – состоящие из различных комбинаций выше перечисленных типов [8, 9]. Рабочие органы таких аппаратов устанавливаются в специально спроектированных проточных участках (к примеру, труба Вентури).

В промышленности кавитация часто используется для гомогенизации (смешивания) 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.

Кавитацию используют для обработки топлива, во время обработки топливо дополнительно очищается (при проведении химического анализа сразу обнаруживается существенное уменьшение количества фактических смол), и перераспределяется соотношение фракций (в сторону более лёгких). Эти изменения, если топливо сразу поступает к потребителю, повышает его качество и калорийность, как следствие более полное сгорание и уменьшение массовой доли загрязняющих веществ [10]. Сейчас до сих пор проходят исследования по влиянию кавитации на топливо, их проводят частные компании и институты, например Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина.

Также были разработаны кавитационные водные устройства очистки, в которых 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 твёрдых веществ, которые находятся в жидкости. Одним из применений таких процессов является измельчение твёрдых включений в тяжёлые топлива, что используется для обработки котельного топлива с целью увеличения калорийности его горения.

Кавитационные устройства снижают вязкость углеводородного топлива, что позволяет снизить необходимый нагрев и увеличить дисперсность распыления топлива.

Кавитационные устройства используются для создания водно-мазутных и водно-топливных эмульсий и смесей, которые часто используются для повышения эффективности горения или утилизации обводнённых видов топлива.

Процессы кавитации используются в кавитационных теплогенераторах, так как 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 °С. Таким образом происходит нагревание рабочей жидкости в зоне схлопывания.

Таким образом, кавитация - это уникальное физическое явление, которое нашло широкое применение в различных отраслях промышленности, медицине и других сферах жизни человека. Развитие технологий и исследований в этой области продолжается, что, несомненно, приведет к еще более широкому использованию кавитации в будущем.

1.2 Смешивающие конденсаторы

Смешивающий конденсатор – это устройство, которое используется для конденсации пара путем контакта жидкости и пара. Он состоит из

камеры смешивания, через которую проходят потоки жидкости и пара, и теплообменника, который переносит тепло с одной жидкости на другую.

Смешивающий конденсатор часто используются в промышленности для процессов, которые требуют точного контроля температуры. Например, они могут использоваться в химическом производстве для смешивания реагентов и охлаждения или нагрева реакционных смесей, а также для конденсации паров и получения жидкости.

Смешивающие конденсаторы имеют ряд преимуществ перед другими устройствами для смешивания, такими как смесители. Они обеспечивают более равномерное распределение жидкостей благодаря теплообменнику, который помогает создать более однородную смесь. Кроме того, они могут быть более эффективными в использовании тепла, что может привести к экономии расходов на энергию.

Для интенсификации процесса конденсации, обуславливаемого теплообменом между паром и охлаждающей водой, необходимо увеличивать площадь их взаимного соприкосновения. Это достигается или подачей воды в конденсатор через небольшие сопла, причем вода распыляется из-за разности давлений в водяной камере и рабочем пространстве конденсатора, или же последовательным стеканием воды струйками с одной дырчатой тарелки на другую. Тот и другой методы применимы как для прямоточных, так и противоточных конденсаторов.

При сопоставлении прямоточных и противоточных смешивающих конденсаторов необходимо учитывать обусловленное наличием значительного содержания воздуха в паре различие в распределении парциальных давлений пара и воздуха, а также температуры смеси и вытекающее из этого различие в необходимой кратности охлаждения и производительности воздушного насоса

В Смешивающем конденсаторе обычно возможно установить только один водяной насос – откачивающий или нагнетающий. Если смешивающий конденсатор расположен невысоко по отношению к уровню забора воды, то

можно использовать разрежение в конденсаторе для подсоса охлаждающей воды к разбрызгивающим соплам и тем самым обойтись без циркуляционного насоса, ограничиваясь лишь одним откачивающим насосом [11].

Струйный конденсатор - это устройство для конденсации паров с использованием струи воды или другой жидкости. Он состоит из корпуса и внутренней трубки, которая разделяет конденсирующую зону и входящую зону. Пар, поступающий из входящей зоны, попадает в струю жидкости, которая входит в конденсирующую зону. В результате соприкосновения пара с жидкостью происходит конденсация пара, а жидкость нагревается и уходит из конденсатора.

Струйные конденсаторы часто используются в промышленности для конденсации паров, которые образуются при перегонке нефти, газа, а также для конденсации паров хлорида водорода в промышленности химикатов. Они обладают высокой эффективностью, однако трубки могут быстро заполняться минеральными солями, что снижает их эффективность. Для предотвращения таких проблем струйные конденсаторы могут быть оснащены устройствами для регенерации воды и очистки трубок.

В основном различают 4 типа струйных конденсаторов: противоточный струйный конденсатор, струйный конденсатор с параллельным током, барометрический конденсатор, эжекторный конденсатор.

1. Противоточный струйный конденсатор

Здесь камера конденсатора расположена на небольшой высоте, а общая высота блока достаточно мала, чтобы конденсатор можно было разместить непосредственно под паровой турбиной, насос или насосы необходимы для удаления конденсата охлаждающей воды и воздуха из конденсатора.

В этом типе конденсатора пара отработавший пар поступает из нижней части камеры конденсатора, а охлаждающая вода поступает из верхней части этой камеры. Пар поднимается внутри камеры, а охлаждающая вода падает сверху через пар. Камера конденсатора обычно снабжена более чем одним

поддоном для воды с отверстиями для разбивания воды на небольшие струи. Процесс очень быстрый.

Сконденсированный пар вместе с охлаждающей водой спускается по вертикальной трубе к экстракционному насосу. Этот экстракционный насос центробежного типа нагнетает воду в горячую скважину. При необходимости часть воды из горячего колодца может отбираться в качестве питательной воды парового котла, а остальная вода направляется в пруд-охладитель. Питательная вода котла забирается из горячего колодца с помощью питательного насоса котла, а избыточная вода самотеком поступает в пруд-охладитель.

Воздушный насос небольшой производительности требуется в верхней части резервуара для конденсата для удаления воздуха и несконденсированного пара. Воздушный насос, необходимый для струйного конденсатора, имеет небольшую производительность по двум основным причинам: он должен справляться только с воздухом и паром; ему приходится иметь дело с небольшим объемом воздуха и пара, так как объем воздуха и пара уменьшается за счет их охлаждения при подъеме через пар конденсирующейся воды.

В этом типе конденсатора пара нет необходимости в дополнительном насосе для подъема охлаждающей воды из пруда-охладителя в камеру конденсатора, так как вода поднимается за счет вакуума, создаваемого в конденсаторе за счет конденсации отработанного пара.

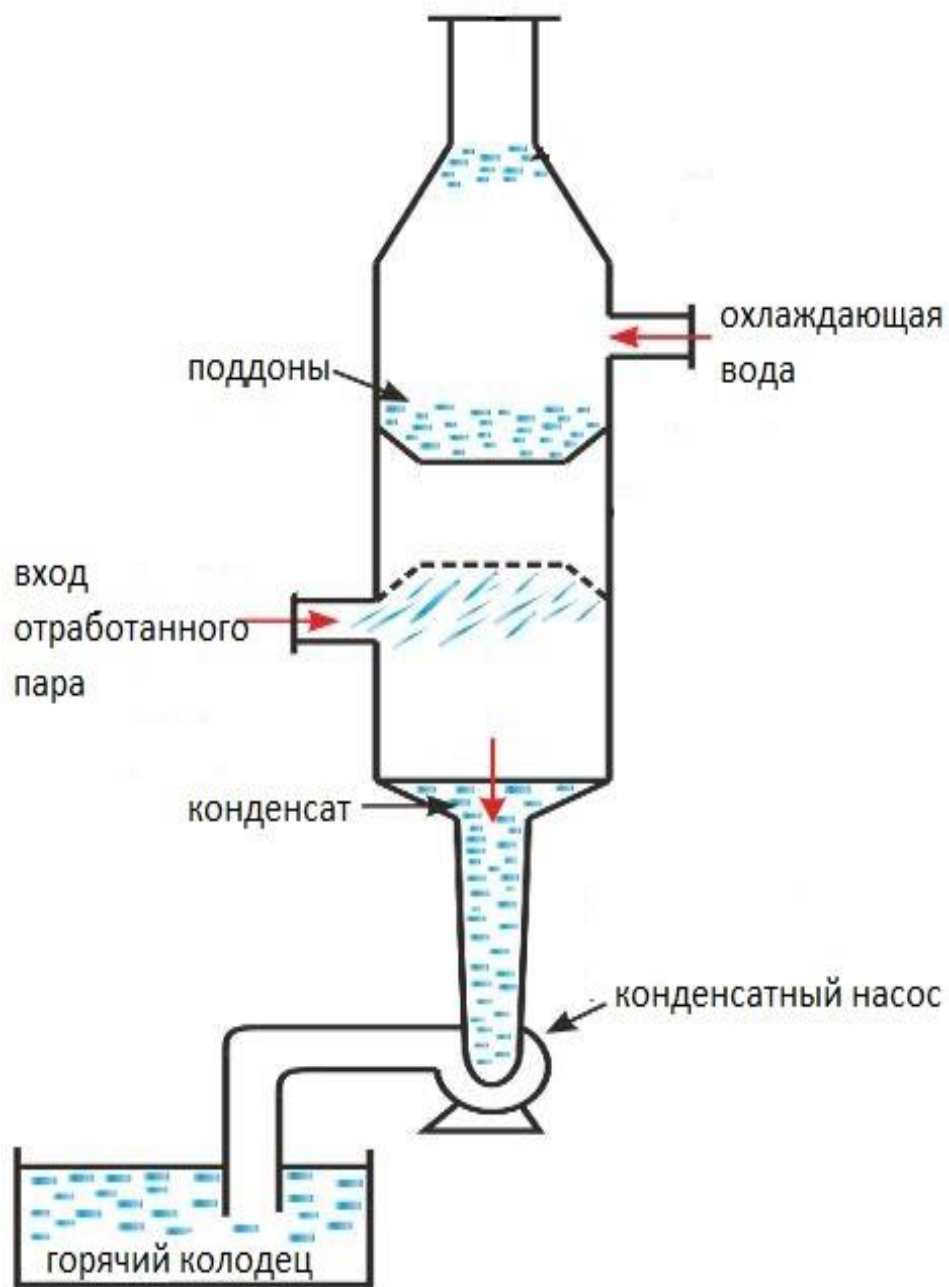


Рисунок 1- Схема противоточного струйного конденсатора

2. Струйный конденсатор с параллельным током

Базовая конструкция струйного конденсатора с параллельным потоком аналогична конструкции струйного конденсатора с противотоком. В этом струйном конденсаторе как охлаждающая вода, так и отработанный пар поступают в камеру конденсатора сверху. Тепловыделение происходит при

падении воды через пар. На рисунке 2 изображен параллельный струйный конденсатор.

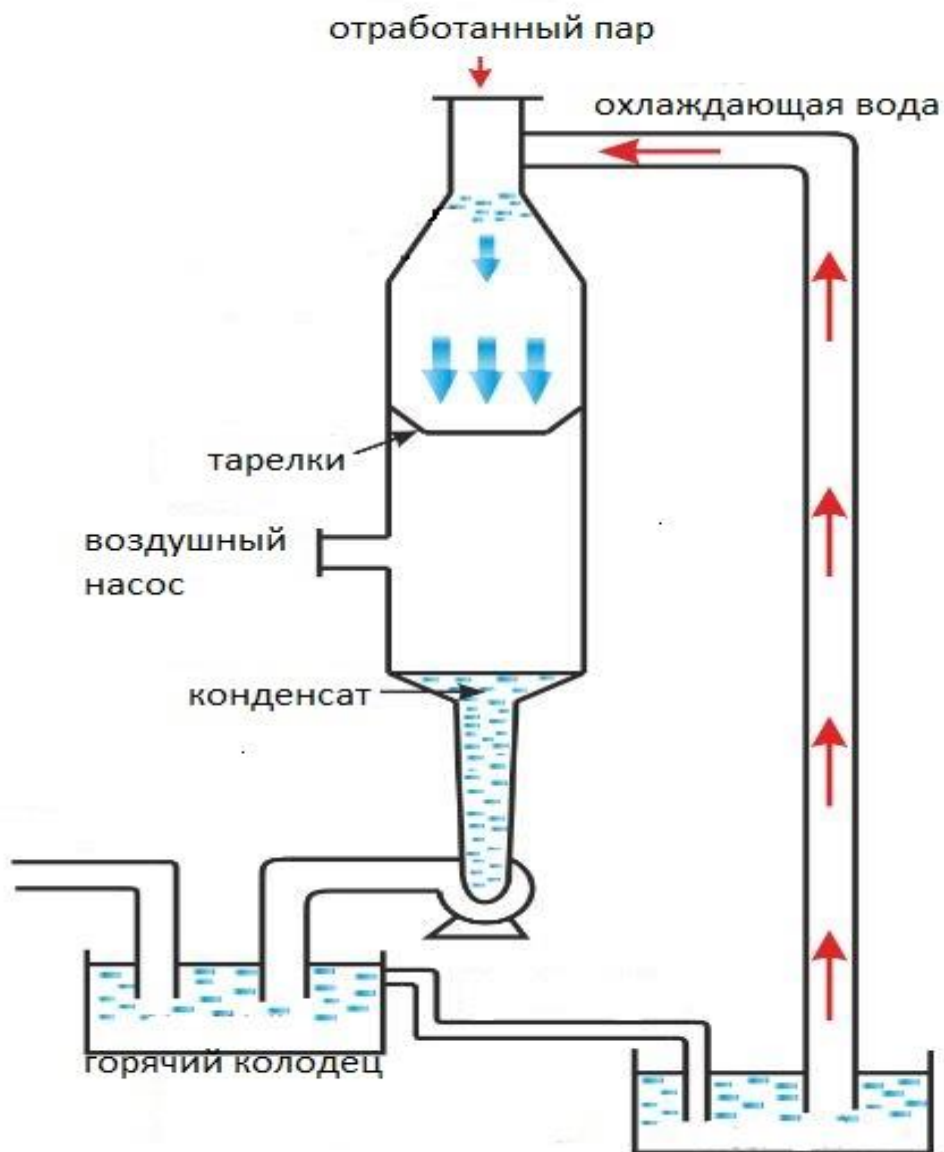


Рисунок 2 – Схема параллельного струйного конденсатора

Охлаждающая вода, сконденсированный пар вместе с влажным воздухом собираются снизу конденсатора с помощью одного насоса. Этот насос известен как насос для мокрой воды. Нет необходимости в дополнительном насосе сухого воздуха в верхней части конденсатора.

Поскольку один насос работает с конденсатом, воздухом и водяным паром, производительность по созданию вакуума в низкоуровневом струйном конденсаторе с параллельным потоком ограничена. Подобно методу встречной струи, нет необходимости в дополнительном насосе для подъема охлаждающей воды из источника или пруда-охладителя в конденсатор, поскольку это происходит только за счет вакуума, создаваемого в конденсаторе из-за конденсации отработанного пара.

3. Барометрический струйный конденсатор

Если длинная труба размером более 10 м закрыта сверху, заполнена водой, открыта снизу и погружена в воду дном, то атмосферное давление будет удерживать воду в трубе на высоте 10 м над уровнем моря [12]. На основе этого принципа сконструирован барометрический струйный конденсатор. На рисунке 3 показан струйный барометрический конденсатор.

При таком расположении труба выпуска воды из нижней части конденсатора идет прямо вертикально к горячему колодцу, расположенному на уровне земли. Охлаждающая вода подается в камеру конденсатора с помощью насоса. Охлаждающая вода поступает со стороны, близкой к верхней части камеры конденсатора.

Отработанный пар поступает со стороны, близкой к нижней части конденсатора. По сути, это противоточный струйный конденсатор. Здесь пар движется вверх внутри конденсатора, а струи воды падают сверху. Конденсаты и охлаждающая вода поступают в горячую скважину через вертикальный патрубок под действием силы тяжести.

Нет необходимости в экстракционном насосе. Несконденсировавшийся пар удаляется из камеры с помощью суховоздушного насоса в верхней части конденсатора. Здесь производительность и размер суховоздушного насоса довольно малы, так как он работает только с воздухом и несконденсированным паром, а не с охлаждающей водой и сконденсированным паром.

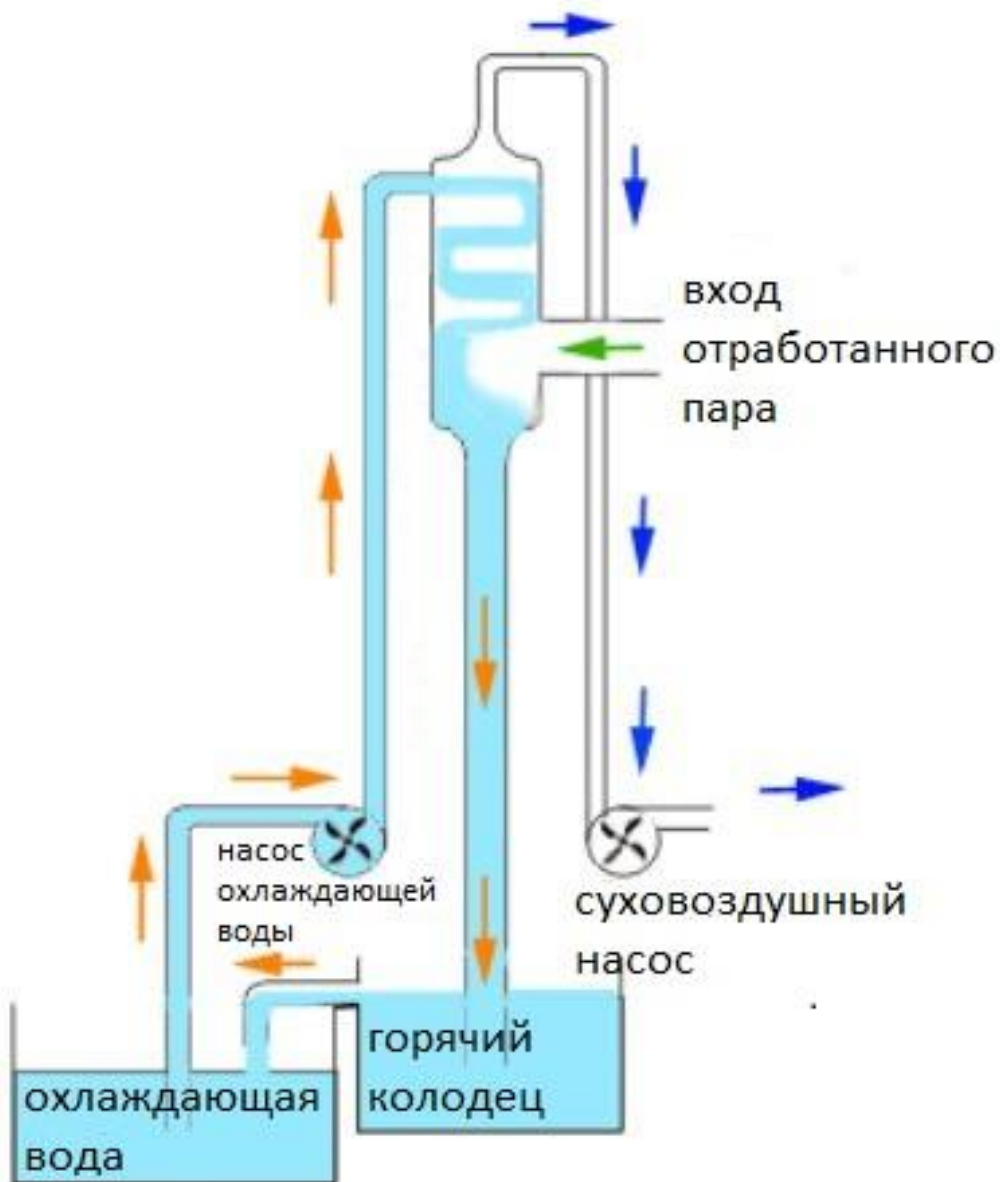


Рисунок 3 – Схема струйного барометрического конденсатора

4. Эжекторный конденсатор

В конденсаторе этого типа импульс падающей воды используется для извлечения или выброса воздуха из конденсата. Конденсаторная камера состоит из центральной вертикальной трубы, в которой имеется ряд множества конусов или сужающихся сопел. Отработанный пар поступает с боковой стороны цилиндрической камеры конденсатора. Центральная труба снабжена целыми или паровыми портами.

Охлаждающая вода падает на верхнюю сужающуюся форсунку с большой скоростью. Эта скорость достигается падающей водой, потому что вода падает с высоты от 2 до 6 м. Эта вода стекает вниз через сходящиеся сопла одно за другим. Пар поступает в форсунки через паровой порт. Когда этот пар вступает в контакт с охлаждающей водой, он конденсируется и создает частичный вакуум.

Из-за этого вакуума все больше и больше пара поступает в вертикальные трубы через отверстия для пара и конденсируется, что приводит к дальнейшему вакууму.

В расширяющихся соплах кинетическая энергия частично преобразуется в энергию давления, так что конденсаты и воздух будут выбрасываться в горячий колодец против давления атмосферы. Эжекторный конденсатор обычно снабжен обратным клапаном на входе выхлопного пара, как показано, для предотвращения внезапного обратного выброса воды в выхлопную трубу турбины в случае внезапного прекращения подачи воды в конденсатор.

Для эжекторного конденсатора требуется больше воды, чем для другого струйного водяного конденсатора [13]. Он прост и надежен, но подходит только для небольших электростанций.

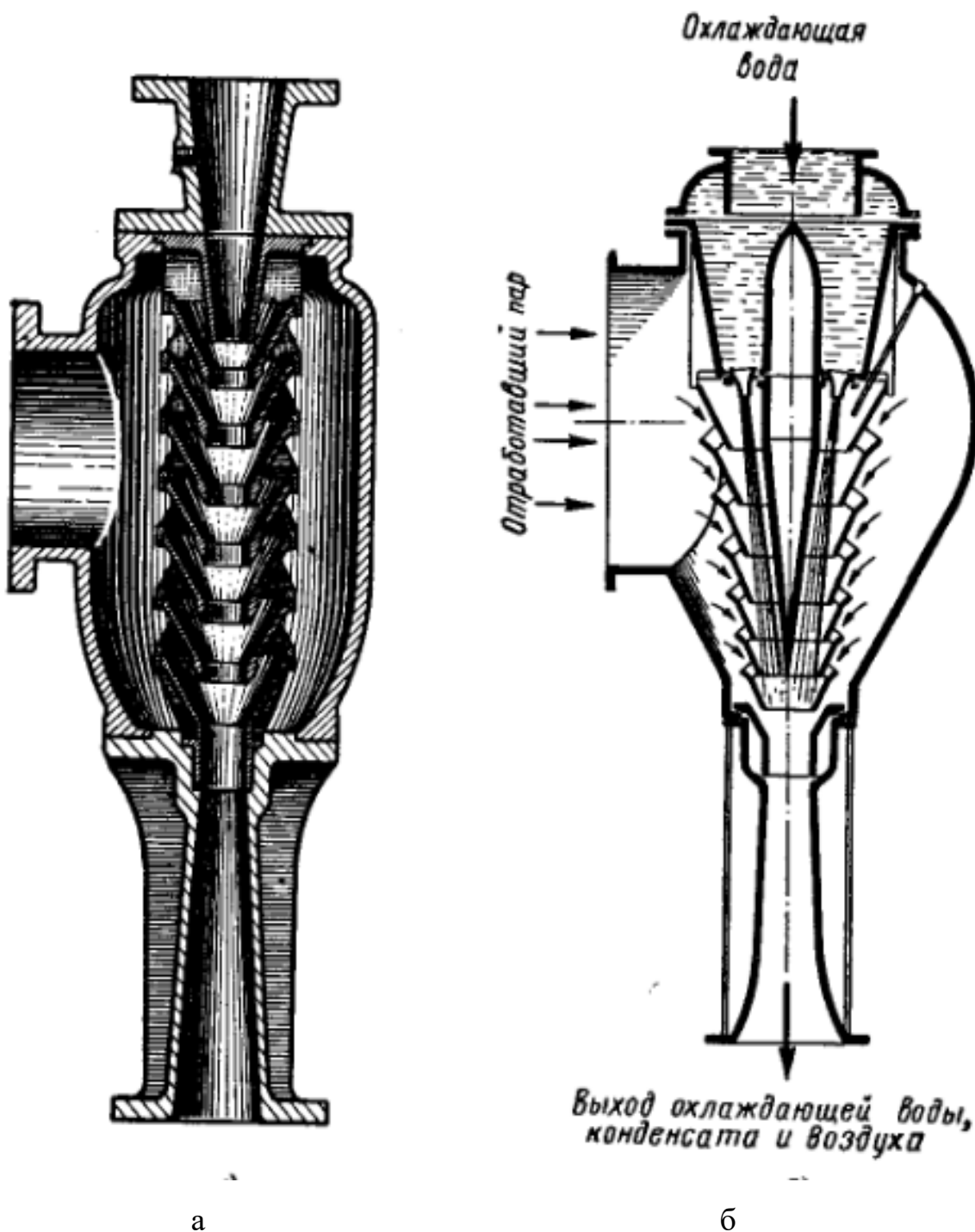


Рисунок 4 – Схемы эжекторных конденсаторов: (а) одноструйный, (б) многоструйный

Достоинство эжекторного конденсата – компактность, простота устройства и универсальность работы: конденсация пара, удаление охлаждающей воды, конденсата и воздуха производится этим аппаратом вследствие напора воды, создаваемого насосом. Недостатком его, помимо

потери конденсата, присущей всем смешивающим конденсаторам, является большой недогрев воды, возникающий потому, что по оси струи вода за короткий срок не успевает нагреться до температуры пара. Из-за большого недогрева являются большая кратность охлаждения, т. е. большой расход охлаждающей воды, чем в обычных смешивающих конденсаторах, худший вакуум из-за значительного парового сопротивления при переходе через узкие каналы; возможность нарушения работы при резком изменении параметров процесса [14]. Вследствие этих причин струйные конденсаторы имеют сравнительно ограниченное распространение, а в паротурбинных установках не применяются.

Преимущества струйных конденсаторов:

- Простой метод
- Экономичный
- Простой дизайн
- Используется меньше охлаждающей жидкости
- Маленький размер
- Меньше затрат на техническое обслуживание

Недостатки струйных конденсаторов:

- Ограничение использования конденсата
- Требование высокой мощности
- Низкая общая эффективность
- Низкая эффективность вакуума

Также для конденсации паров жидкости могут быть использованы процессы кавитации. Наиболее приближенным к кавитационному конденсатору по принципу действия является рассмотренный выше эжекторный конденсатор. Кавитационный конденсатор - это тип теплообменного оборудования, используемого для конденсации, путем извлечения тепла из пара и передачи его в жидкость. Конденсатор использует

эффект кавитации, который происходит при изменении давления в жидкости в результате быстрого движения газовых пузырьков внутри нее.

В кавитационном конденсаторе пар проходит через сужающийся канал, что приводит к увеличению скорости потока и понижению давления. Это вызывает образование газовых пузырьков в жидкости, которые затем движутся в область расширения канала, где они сжимаются в результате повышения давления и выделяют тепло, которое передается жидкости.

Кавитационные конденсаторы могут быть использоваться в различных отраслях промышленности, включая энергетику, нефтегазовую промышленность и химическое производство. Они обычно имеют высокую эффективность и компактность, что позволяет уменьшить затраты на энергию и место для установки. Кроме того, кавитационные конденсаторы могут работать при высоких температурах и давлениях, что делает их полезными для процессов с высокими требованиями к теплообмену.

2 Экспериментальная установка

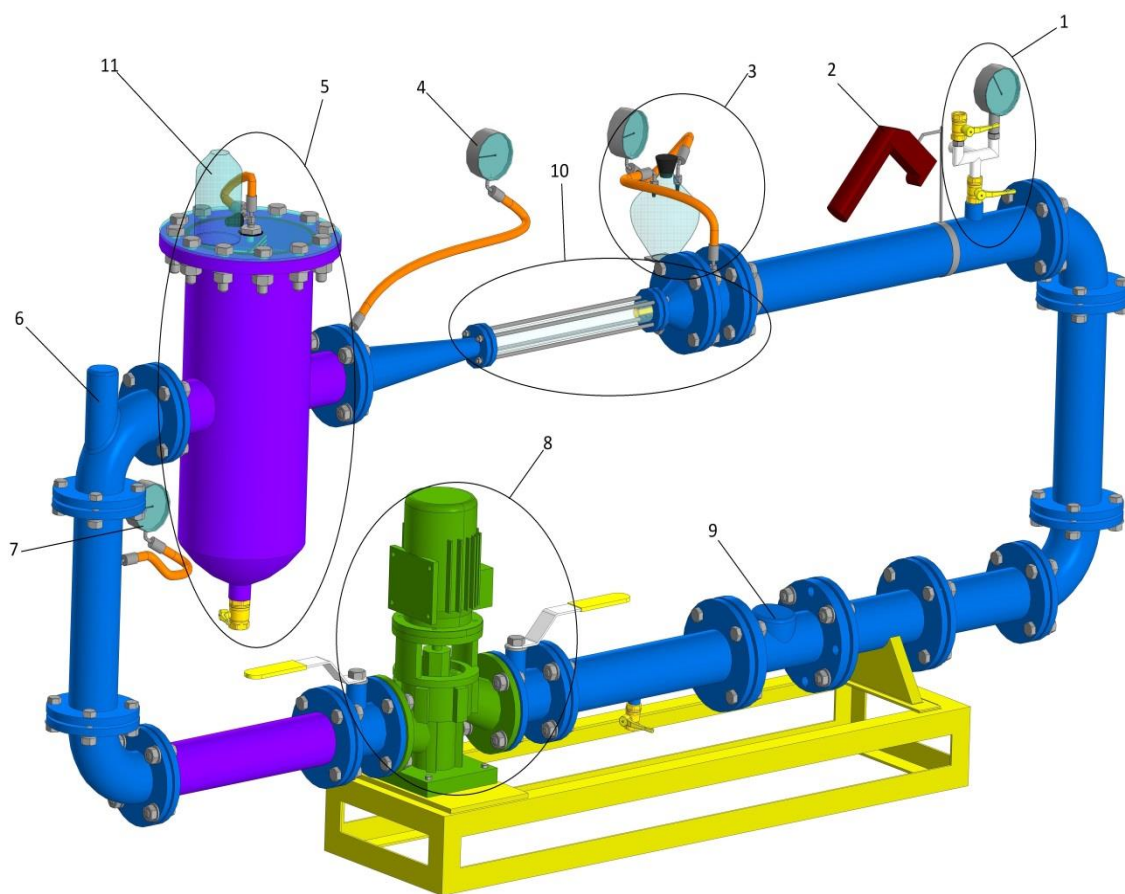
Экспериментальный стенд, изображенный на рисунке 5, представляет из себя, ряд основного оборудования:

- насос ЛМ65-20/25, изображенный на рисунке 5 под номером 8;
- кавитационный участок 10;
- сепаратор 5 воздуха и шлама СВШ-100;
- счетчик 9 воды ВСХНд 100.

Также вспомогательное оборудование:

- нагреватель воды 6;
- пирометр 2 RAYTEK RAYNGER ST 80;
- манометры 4,7;
- вакуумметр 3;

В дальнейшем будут рассмотрены краткие характеристики каждого компонента, для ознакомления с характеристиками и обоснованностью выбора того или иного компонента в экспериментальном стенде.



1 – система труб для подачи водопроводной воды в систему и манометр; 2 – пирометр; 3 – вакуумметр; 4,7 – мановакуумметры; 5 – сепаратор; 6 – нагреватель; 8 – электронасос; 9 – счетчик расхода воды; 10 – кавитационный участок; 11 – емкость для отслеживания уровня воды

Рисунок 5 – Устройство экспериментальной установки

2.1 Основное оборудование

2.1.1 Кавитационный участок

К кавитационному участку, представленному на рисунке 6, присоединен хоннейкоб, который предназначен для уменьшения турбулентности набегающего потока, представлен на рисунке 7 под номером

1. Он состоит из 31 латунной трубки с внутренним диаметром 14 мм, толщиной стенки 0,8 мм и длиной 400 мм.

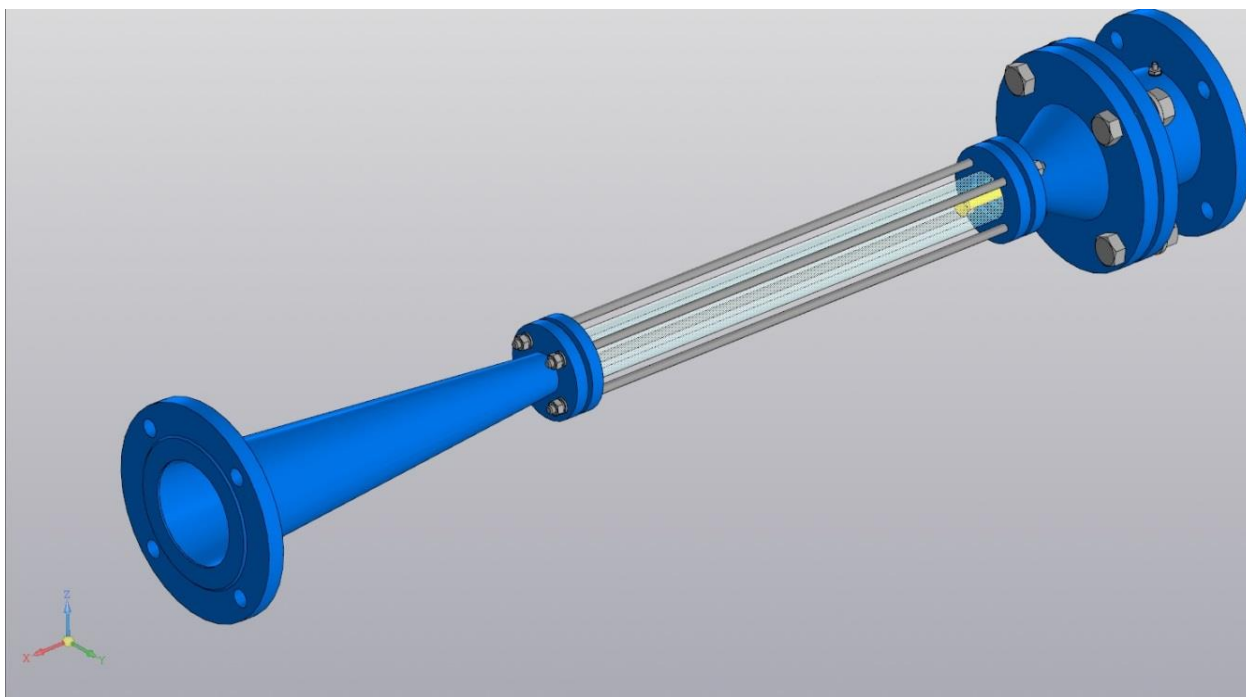


Рисунок 6 – Кавитационный участок

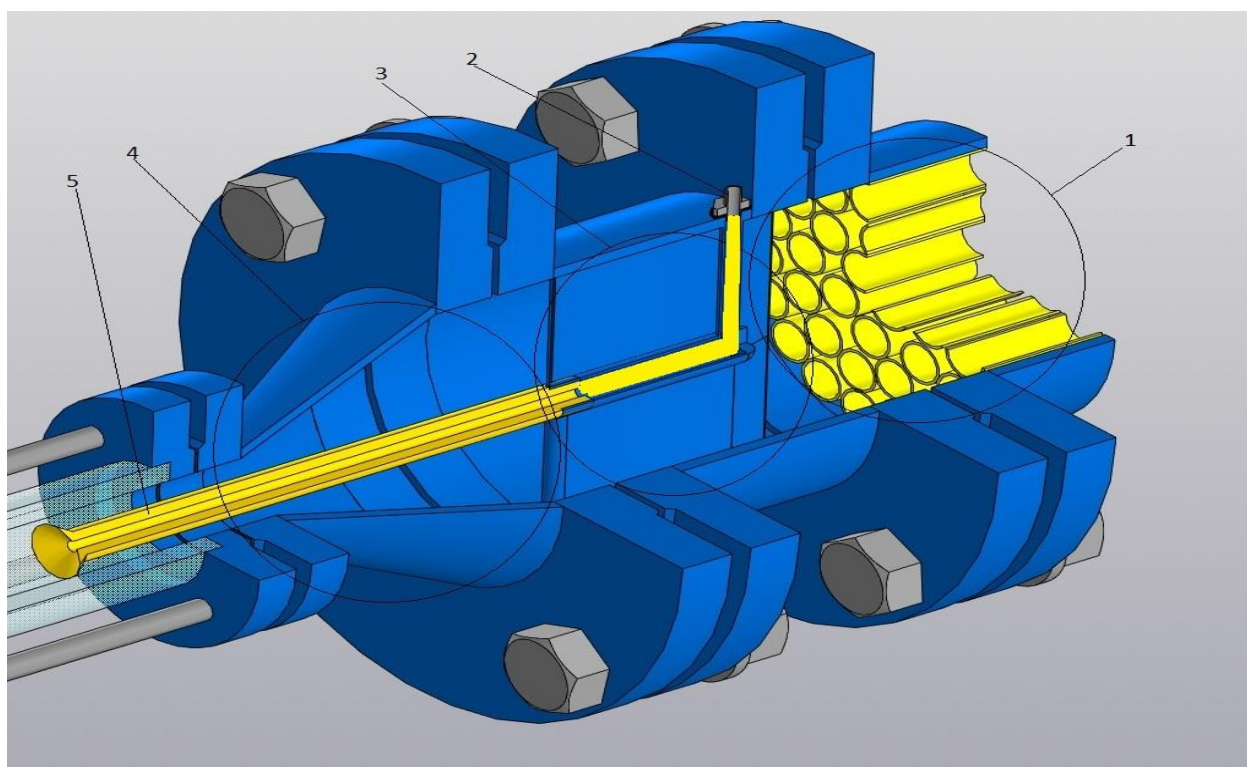


Рисунок 7 – Часть кавитационного участка в разрезе

Далее в кавитационном участке расположена полая перегородка. В перегородке монтируется латунная трубка необходимая для создания каверны и штуцер на вакуумметр, предназначенный для измерения разрежения в участке образования каверны.

Дальше поток попадает в участок 4, который постепенно сужается. Начальный диаметр 100мм, а конечный 30 мм и длина 91 мм.

Потом поток обтекает трубку, которая выполнена в виде сопла, с диаметром на конце трубки 21,75 мм, внутренним диаметром 4 мм и толщиной стенки 4 мм.

Затем поток проходит через наблюдательный участок, диаметром 30 мм, толщиной стенки 8 мм и длиной 462 мм, ранее длина наблюдательного участка составляла 362 мм, но она была изменена, потому что при определенных начальных скоростях кавитационная каверна выходила за границы наблюдательного участка, что в последствии затрудняло снятие точных экспериментальных данных.

В дальнейшем поток попадает в расширяющуюся трубу, длиной 419мм.

2.1.2 Насос ЛМ 65-20/25

Назначение и применение

Электронасос ЛМ 65-20/25 предназначен для работы в стационарных условиях для перекачивания чистой воды производственно-технического назначения (кроме морской) с рН от 6 до 9, с температурой перекачиваемой жидкости в диапазоне от 0 до +85°С при комплектации сальниковым уплотнением и от 0 до +140°С при комплектации торцовым уплотнением вала.

А также других жидкостей, сходных с водой по плотности, по вязкости и по химической активности, содержащих твердые включения в количестве не более 0,1% по размерам частиц до 0,2 мм.

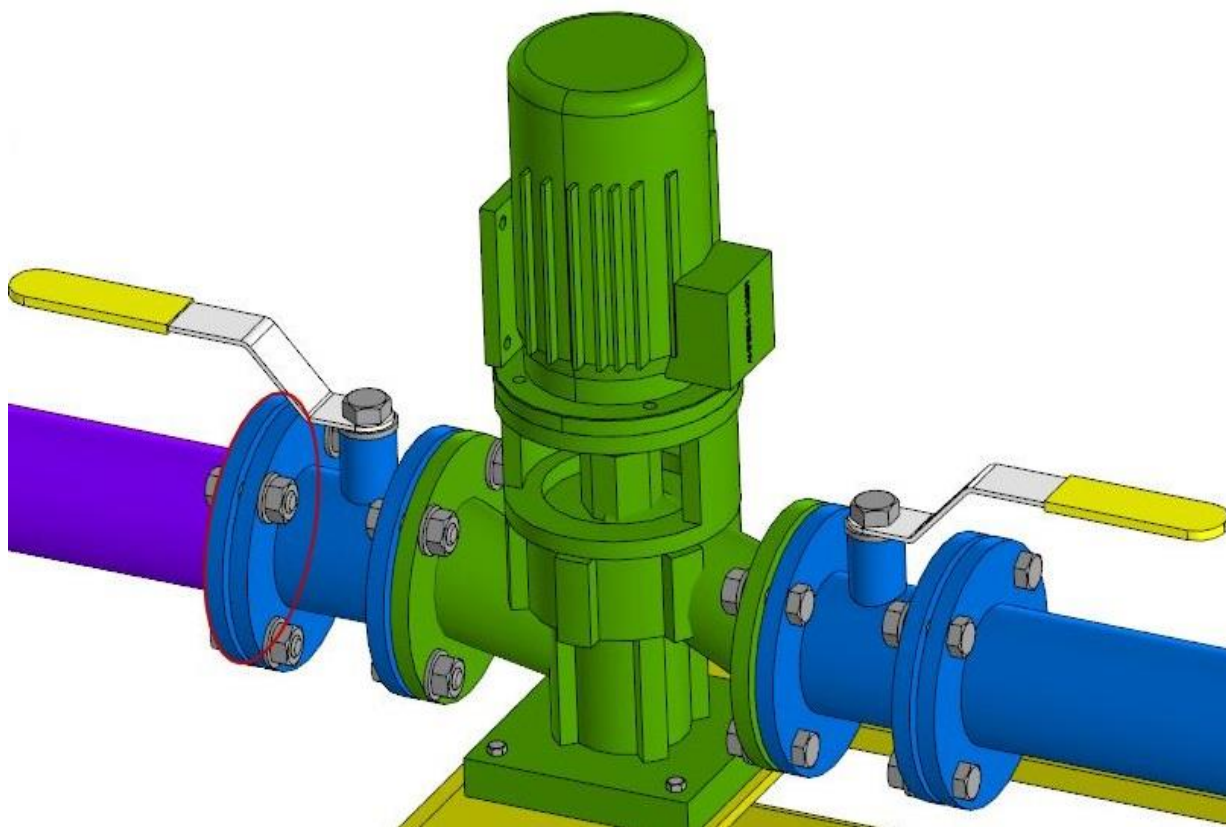


Рисунок 8 – Электронасос ЛМ 65-20/25

Устройство и принцип работы

Электронасос ЛМ 65-20/25 центробежный, консольный, моноблочный, линейный, состоит из центробежного насоса и фланцевого асинхронного электродвигателя с удлиненным концом вала. Электронасос может собираться на фланцевом электродвигателе со стандартным концом вала. В этом случае на конец вала электродвигателя устанавливается съемный удлинитель. Подвод и отвод перекачиваемой жидкости - радиальный.

Подвод и отвод перекачиваемой жидкости радиальный. Всасывающий и напорный патрубки насоса расположены в линию под углом 90° к продольной оси насоса. Проточная часть насоса состоит из корпуса насоса, прикрепленного к фланцу фонаря, крышки корпуса, являющегося корпусом сальника, и закрытого рабочего колеса. Уплотнение вала – одинарное торцовое или мягкий сальник. Для предотвращения износа вала под уплотнением на валу имеется защитная втулка. Направление вращения

ротора – по часовой стрелке, если смотреть со стороны электродвигателя (проверяется пробным пуском). Направление вращения ротора и движение потока жидкости указаны стрелками на корпусе насоса. Перед эксплуатацией насос должен быть заземлен.

Таблица 1 – Основные характеристики насоса

Подача, м ³ /ч	20
Напор, м	25
Кавитационный запас, м	3
Частота вращения электродвигателя, об/мин	3000
Мощность, кВт	4

2.1.3 Счетчик воды ВСХНд 100

Описание и назначение счетчика

Тахометрический турбинный счетчик с фланцевым присоединением марки ВСХНд100, представленный на рисунке 9, используется для измерения и учета расхода холодной воды. Он устанавливается на промышленных трубопроводах, подающих сетевую и питьевую холодную воду, с диаметром проходного отверстия равным 100 мм. Приборы учета измеряют объем проходимой по трубопроводу воды в кубических метрах и долях. Данные измерений отображаются на циферблате при помощи роликового и стрелочного индикаторов.

Счетчики ВСХНд-100 устанавливают на системах холодного водоснабжения с температурой рабочего потока от +5 до +50°С и давлением подачи воды не более 1,6 МПа. Производитель рекомендует размещать измерительные приборы данного типа в закрытых отапливаемых помещениях с влажностью воздуха не более 80% и температурой окружающей среды не ниже +5 °С. Место установки выбирают так, чтобы исключалась возможность затопления прибора.



Рисунок 9 – Счетчик воды ВСХНд -100

Таблица 2 – Характеристики счетчика

Номинальный диаметр, мм	100
Температура, °С	От +5 до +50
Расход воды, м ³ /ч:	
Наименьший	0,6
Переходный	1,8
Номинальный	230
Наибольший	300
Максимальное рабочее давление, МПа	1,6

2.1.4 Сепаратор воздуха и шлама СВШ-100

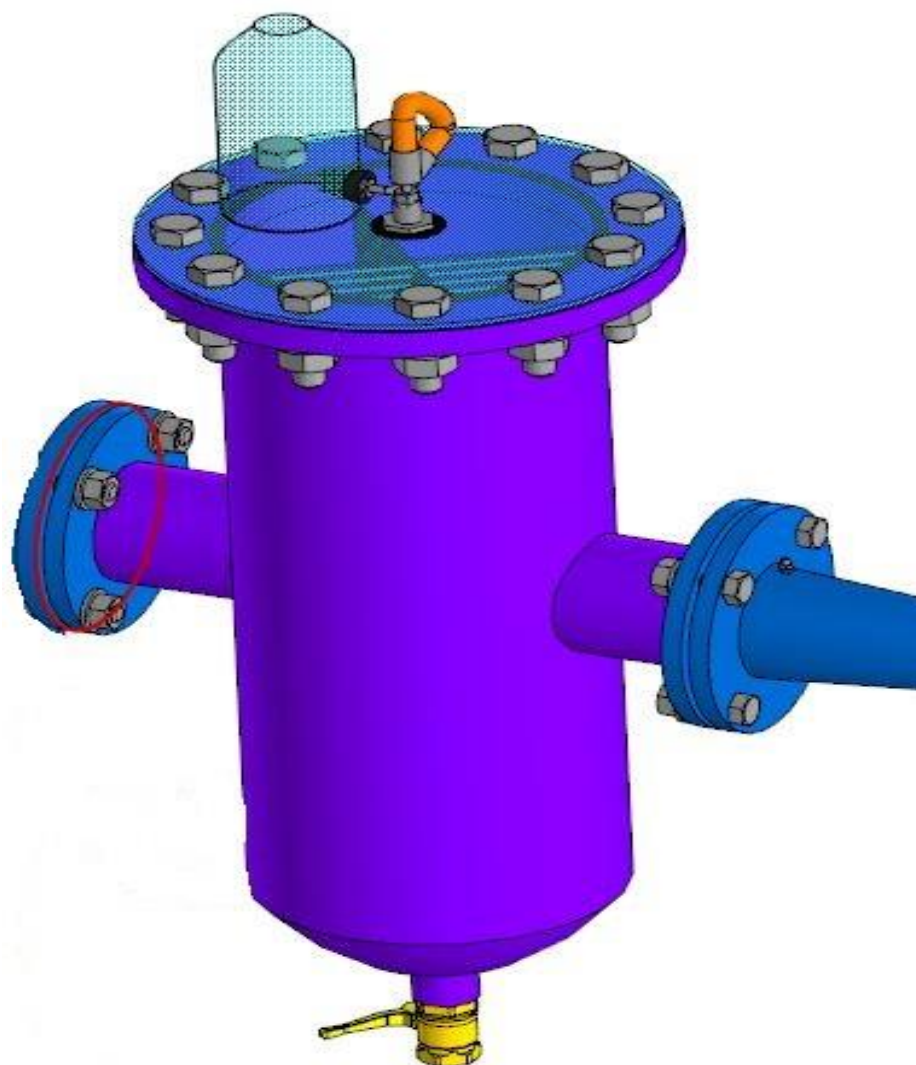


Рисунок 10 – Сепаратор СВШ-100

Сепаратор воздуха и шлама - это устройство, которое используется для удаления из воды воздуха и частиц шлама перед ее подачей в систему отопления или другие технологические процессы. Сепараторы воздуха и шлама могут быть установлены в качестве отдельных устройств или встроены в системы отопления и водоснабжения.

Сепараторы воздуха и шлама используются в тех системах, где требуется высокая чистота воды, например, в системах отопления, кондиционирования и водоснабжения. Они позволяют улучшить производительность системы, снизить расходы на ремонт оборудования и продлить его срок службы.

Назначение

Удаления воздуха и шлама из жидкостных систем тепло- и холодоснабжения

Основная функция сепараторов состоит в том, чтобы удалять из систем тепло- холодоснабжения микроскопические пузырьки воздуха и шлам (песок, взвеси, ржавчину, магнетит и др.).

Использование сепараторов значительно увеличивает срок службы систем, снижает образование шламовых отложений на стенках трубопроводов, приборов, котлов, теплообменников, увеличивает коэффициент теплопередачи, улучшает гидравлический режим, поэтому сепараторы, установленные в системы тепло- и холодоснабжения, являются энергосберегающим оборудованием.

Конструкция и принцип работы

Сепаратор воздуха и шлама имеет две зоны покоя, для накопления как воздуха, так и шлама. В верхней части сепаратор оснащен воздухоотводчиком для автоматического отвода воздуха. В нижней части расположен дренажный вентиль для сброса шлама. Внутри сепаратора установлены сепарирующие элементы. Основная функция элемента – отвод микропузырьков в полость воздухоотводчика вверх и осаждения нерастворимых частиц шлама на дне сепаратора. Герметичность системы при этом не нарушается.

2.2 Вспомогательное оборудование

2.2.1 Манометр

Манометр - это измерительный прибор для определения давления газа или жидкости в системе. Он состоит из корпуса, который включает трубку с жидкостью, штуцера для подключения к системе и шкалы, на которой отображается значение измеряемого давления. Манометры могут иметь различные типы: от механических до электронных, от дифференциальных до абсолютных.

Манометры широко применяются в различных отраслях, таких как промышленность, медицина, автомобильное производство, а также в быту, например, для измерения давления в шинах автомобилей или водопроводных системах.

На экспериментальной установке установлен манометр МО-11201, представлен на рисунке 11, на входе в кавитационный участок. Диапазон измерения прибора от 0 до 2,5 кгс/см², ценной одного деления 0,02 кгс/см² и классом точности 0,4.



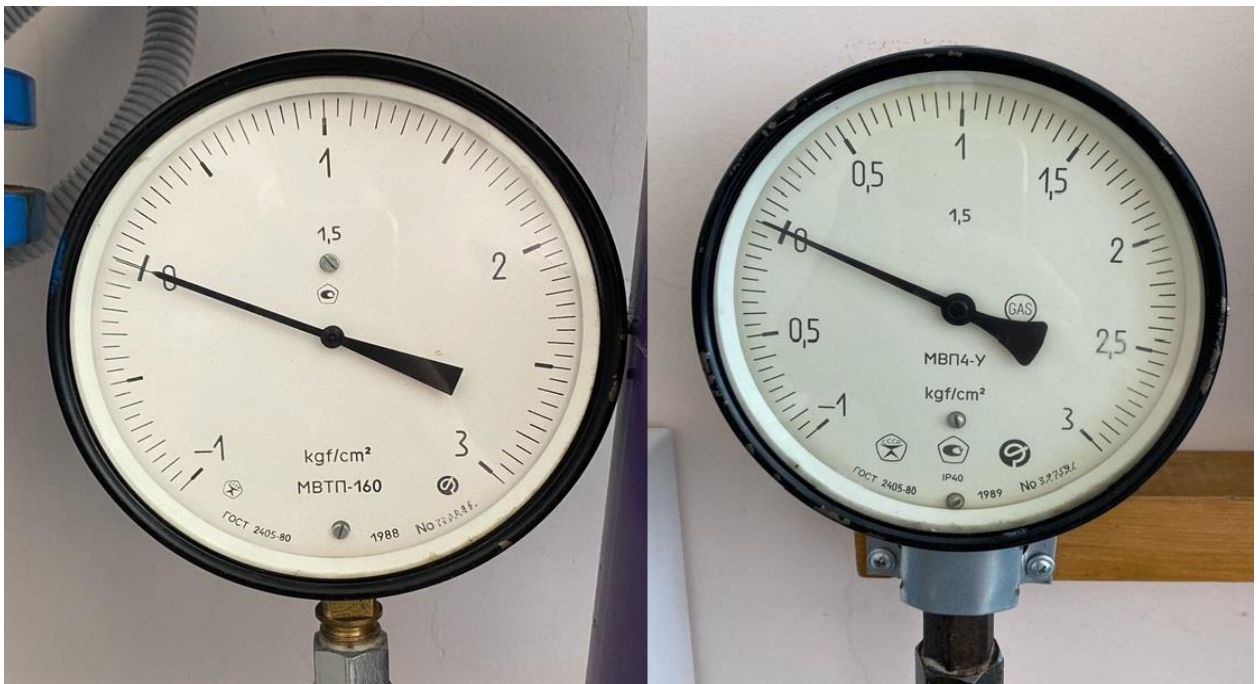
Рисунок 11 – Манометр МО-11201

Выбор манометра обоснован подходящими характеристиками для проведения исследований в экспериментальной установке, а именно классом точности и диапазоном для измерения давления в стенде, вполне достаточным для выбранного измерительного прибора.

2.2.2 Мановакуумметры

Мановакуумметр - это измерительный прибор, который используется для измерения как вакуума, так и избыточного давления в системах, устройствах и оборудовании. Он отличается от обычного манометра тем, что он может измерять как положительное, так и отрицательное давление, и может использоваться в широком диапазоне давлений. При работе мановакуумметр использует изменения давления, чтобы двигать механизмы, часто на основе пружин или других типов датчиков. Значения измеряемого давления могут быть загружены на цифровые индикаторы, где пользователь может проанализировать результаты и принять необходимые действия. Мановакуумметры применяются в различных сферах: от производства и технического обслуживания до лабораторных и медицинских целей. На экспериментальной установке установлено два мановакуумметра: ПВТП-160 расположен после сепаратора, а МВП4-У после кавитационного участка. Приборы имеют шкалу от -1 до 3 кгс/см² с ценной одного деления 0,05 и классом точности 1,5%.

Выбор данных мановакуумметров обусловлен подходящими характеристиками приборов для исследований в экспериментальной установке, а именно высокая точность и подходящий диапазон для измерения в установке.



а

б

Рисунок 12 – Мановакуумметры (а) МВТП-160 и (б) МВП4-У

2.2.3 Нагреватель воды

Нагреватель, который изображен на рисунке 13, мощностью 9 кВт представляет из себя тэну и регулирующую реле, на которой выставляется температура нагрева, температурный диапазон от 10°C до 120°C. Также нагреватель взаимосвязан с насосом, только при включенном насосе нагреватель работает совместно с установкой.

Выбор нагревателя обосновывается тем, что мощности нагрева, вполне достаточно, для нагрева воды в экспериментальном стенде.



Рисунок 13 – Нагреватель воды

2.2.4 Вакуумметр

Вакуумметр – это измерительный прибор, который служит для измерения вакуума в созданной системе. Он работает на основе изменения давления воздуха и может использоваться для измерения вакуума в широком диапазоне. Вакуумметры могут быть аналоговыми или цифровыми, и имеют различные типы индикаторов - от стрелочных до светодиодных дисплеев.

Большинство вакуумметров используются для контроля вакуума в различных системах, таких как системы кондиционирования воздуха, системы отопления и охлаждения, вакуумные помпы и другие промышленные системы. Кроме того, вакуумметры также используются в научных лабораториях и медицинском оборудовании, где точность измерений является чрезвычайно важной.



Рисунок 14 – Вакуумметр

Вакуумметр для измерения разряжения в кавитационном участке состоит из колбы для отбора конденсата, которая соединяется со штуцером с помощью соединительной трубки, а вторая трубка идет на вакуумметр для замера разряжения.

Выбор данного вакуумметра обоснован диапазоном измерения, который необходим для проведения экспериментов на установке.

2.2.5 Пирометр

Пирометр - это прибор для измерения температуры поверхности объекта без контакта с ним. Он работает на основе измерения инфракрасного излучения, которое излучается объектом. Пирометры используются в различных областях, включая промышленность, медицину, науку и технику. Они могут быть ручными или стационарными, иметь различные диапазоны измерения и точность.

Лазерные пирометры RAYTEK Raynger ST80 ProPlus измеряют более высокие температуры, маленькие объекты и имеют ряд преимуществ, таких как сигнализация, регулируемый коэффициент излучения и функциональные возможности регистрации данных.



Рисунок 15 – Пирометр ST80 ProPlus

Лазерные пирометры обеспечивают более точное измерение температуры благодаря модернизированному 8-точечному лазерному прицелу Laser Guide и регулируемому коэффициенту излучения, что позволяет более быстрое и простое нацеливание на объект и получение более точных показаний.

Усовершенствованная оптика позволяет измерение температуры объектов меньшего размера с больших расстояний.

Пирометр производит мгновенные измерения максимальной, минимальной, средней и разницы температур, параметры которых задаются пользователем.

Выбор данного пирометра обоснован высокой точностью измерений, низкой задержкой измерения и диапазоном температур, достаточным для проведения экспериментов.

Таблица 3 – Основные характеристики пирометра

Диапазон измерения температуры, °С	От -32 до +760
Оптическое разрешение	50:1
Точность, %	1
Время отклика, мсек	500
Рабочая температура, °С	0-50
Лазерный прицел	8 точечный круговой
Память	12 значений
Вес, г	320

2.2.6 Аппаратная часть для измерения скорости в LabVIEW

Предназначен для качественного съема данных с счетчика воды ВСХНд 100, а именно расхода и скорости потока. Импульсный сигнал с счетчика передается на многофункциональную плату клеммников PCLD-8710, далее сбор данных производится на шине PCI-1710HG-B и частотой выборки до 100 кГц, в которой сигнал преобразуется в цифровой, а далее передается на обработку в программу LabVIEW, которая в свою очередь выдает данные в требуемом нам виде.

3 Подготовка и принцип работы экспериментальной установки

Для начала проведения экспериментов необходимо подготовить установку к дальнейшим исследованиям, установка, которая изображена на рисунке 5, наполняется водопроводной водой, для поддержания уровня воды в системе, нужно следить за заполнением емкости 11, которая расположена на сепараторе 5, если емкость начинает заполняться водой, следует прекратить поступление водопроводной воды. Потом следует, включить насос 8 для того, чтобы удалить воздух из экспериментального стенда, для того чтобы отслеживать выход воздуха, необходимо обращать внимание на емкость 11, если водовоздушных пузырей не возникает, то можно выключать насос.

После подготовки, можно приступить к исследованию, для этого включаем насос 8 и при помощи задвижек на насосе и манометра 1 регулируем скорость набегающего потока в экспериментальной установке, тем самым меняя давление на входе в кавитационный участок. Чтобы ускорить нагрев воды в установку был добавлен нагреватель 6, при помощи которого вода быстрее приходит к состоянию насыщения, при котором начинает возникать кавитационная каверна. В процессе исследования, нужно обращать внимание на уровень воды в емкости 11, из-за конденсирования паров в вакуумметрической емкости 3 и выделении воды из насоса 8, приходится периодически подливать воду в емкость 11.

В процессе исследования записываются ряд данных, такие как температура воды в системе, принимаются по пирометру 2, давление разрежения в кавитационном участке, принимаем по вакуумметру 3, длину каверны, принимаем по измерительному прибору установленному на кавитационном участке 10, давление на выходе из кавитационного участка 10 снимается при помощи моновакуумметров 4 и 7, а также для снятия качественных данных скорости, применяется импульсный счетчик воды 9 подключенный к блоку программного обеспечения LabVIEW.

Первоначально на установке был установлен секундомер, который был подключен к импульсному счетчику воды 9, один импульс счетчика равнялся прохождению 100 л, но данный метод снятия данных требовал усовершенствования, потому что, для снятия качественных данных, приходилось каждый раз сбрасывать счетчик на нулевое значение и секундомер выдавал не точные результаты. В следствии чего было решено разработать программное обеспечение в LabVIEW для считывания скорости воды.

Принцип работы программы показан на блок-схеме, рисунок, это считывания аналогового сигнала выдающего с счетчика воды 9, преобразования этого сигнала в цифровые данные и расчета скорости набегающего потока. Импульс, после прохождения 100 литров воды, приходит на многофункциональную плату клеммников, PCLD-8710 в 5 канал, далее сбор данных производится на шине PCI-1710HG-B, с частотой выборки до 100 кГц. После этого данные попадают в программу, где в начале преобразуются в цифровой формат, потом задается условие, суть которого, получения нулевого сигнала, если нулевой сигнал улавливается, то программа считает время прохождения 100 литров воды, если нет, то сигнал выявляется программой как ошибка и в дальнейшем этот результат не будет учитываться.

После снятия последних опытных данных, как правило, это когда кавитационная камера выходит из зоны наблюдения в кавитационном участке 10, необходимо выключить насос и слить воду с системы. Следует соблюдать температурный режим при сливании горячей воды в канализацию, для этого смешивается горячая вода с холодной из водопровода. Далее после полного слива воды, следует вылить воду из вакуумметрической емкости 3. В случае если после слива воды требуется провести еще один эксперимент, следует залить воду в систему для интенсификации теплообмена, для охлаждения установки.



Рисунок 16 – Блок-схема программного обеспечения

4 Проведение эксперимента по определению режимов работы и производительности кавитационного конденсатора

Несмотря на очевидность всех преимуществ использования кавитационных процессов для конденсации пара до настоящего времени отсутствуют аппараты, созданные на этой основе. Это связано в том числе с отсутствием достаточного количества исследований в данной области.

Для подтверждения предположения о том, что количество отбираемого из каверны пара должно быть равно количеству пара, передаваемого в каверну извне, был поставлен соответствующий эксперимент.

Ход эксперимента

В качестве нагревателя использовалась тонкостенная емкость, представленная на рисунке 17, из алюминия объемом 500 мл, с толщиной стенок 1 мм. В емкость заливалось 300 мл прокипяченной дистиллированной воды. Далее для нагрева и поддержания температуры емкость помещалась в термостат. Для измерения температуры к внешней поверхности емкости была присоединена термопара типа К, закрытая снаружи слоем тепловой изоляции толщиной 5 мм и защищенная слоем эпоксидного компаунда.

Термопара подключена через клеммный адаптер Advantech PCLD-8710 к многофункциональной плате сбора данных Advantech PCI-1710. Программа на LabView выводила получаемый от термопары сигнал на графический монитор и передавала данные в файл Excel. Данные считывались через каждые 100 миллисекунд.

Емкость была присоединена к паропроводу диаметром 5 мм и погружена в термостат. При достижении определенной температуры открывалась задвижка и создавалось давление разряжения. Образующийся пар проходил через паропровод и конденсировался в каверне.



Рисунок 17 – экспериментальная емкость

Количество пара, сконденсировавшегося в камере, определялось по убыли массы воды в емкости. В результате эксперимента получена зависимость количества пара, переданного из парогенератора в кавитационную камеру от температуры, рисунок 18.

Рисунок 18 – Количество пара сконденсировавшегося в каверне через паропровод 5 мм

Мощность парообразования - это количество теплоты, необходимой для превращения жидкости в пар. Она измеряется в киловатт (kW). Мощность парообразования зависит от таких факторов, как начальная температура жидкости, ее количество и растворимость, а также давление и температура окружающей среды. Эта величина часто используется в промышленности, особенно в производстве паровых турбин и котлов.

Формула по которой рассчитывали мощность парообразования:

$$Q = \frac{G_v \cdot r}{3600}$$

Q – мощность парообразования, кВт;

G_v – расход конденсата, л/ч;

r – скрытая теплота парообразования, кДж/кг.

Рисунок 19 – Зависимость мощности парообразования от температуры

На рисунке 19 можно увидеть, что чем выше температура, тем больше становится мощность парообразования

Формула для нахождения скорости движения пара в паропроводе
d=5мм:

$$\omega = \frac{G \cdot V}{3600 \cdot \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

G – массовый расход пара, кг/ч;

V – удельный объем пара, м³/кг;

d – внутренний диаметр трубопровода, м.

Вычисленные скорости пара в паропроводе укладываются на прямую, параллельную зависимости скорости звука в паре от температуры, рисунок 20.

Рисунок 20 – Скорость пара в паропроводе: верхняя линия – скорость звука в паре

Также проводился другой эксперимент с использованием установки в режиме парогенератора. В данном опыте использовался теплообменник Nord серии E. Пластинчатый теплообменник - это устройство, которое используется для передачи тепла между двумя средами, обеспечивая эффективный и быстрый теплообмен. Он состоит из набора металлических пластин, которые связаны вместе и имеют ряд отверстий для прохождения жидкостей. Когда жидкости протекают через эти отверстия, они проходят через тонкий слой между двумя пластинами, и тепло передается от одной жидкости к другой. Пластинчатые теплообменники применяются во многих областях, включая отопление, кондиционирование воздуха, пищевую промышленность, нефтяную промышленность и многое другое.



Рисунок 17 – Пластинчатый теплообменник серии E

Таблица 4 – Основные характеристики теплообменника

Производитель	Nord
Общее количество пластин, шт.	8
Поверхность теплообмена, м ²	0,5
Материал пластин	AISI316
Материал прокладок	EPDM
ДУ, мм	32
Масса ПТО, кг	66
Максимальное количество пластин, шт.	21
Длина пакета пластин мин./макс., мм	22/22,8
Средний срок службы, год, не менее	15

Основное уравнение теплопередачи:

$$Q = F \cdot k \cdot \Delta t_{cp}$$

Количество теплоты, передаваемой в единицу времени:

$$Q_1 = G_1 \cdot r + G_k \cdot C_k \cdot (t'_k - t''_k) = \left(\frac{8,25}{3600}\right) \cdot 2391,6 + \left(\frac{8,25}{3600}\right) \cdot 4.1783 \cdot$$

$$(40,16 - 17,8) = 5,7 \text{ кВт}$$

G_1 – расход горячего теплоносителя, кг/ч

r – удельная теплота парообразования, кДж/кг

G_k – расход конденсата, кг/ч

C_k – теплоемкость конденсата, кДж/(кг·°C), определялось по таблице 5

Таблица 5 – Удельная теплоемкость воды

Температура, °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	4,2174	4,2138	4,2104	4,2074	4,2045	4,2019	4,1996	4,1974	4,1954	4,1936
10	4,1919	4,1904	4,1890	4,1877	4,1866	4,1855	4,1846	4,1837	4,1829	4,1822
20	4,1816	4,1810	4,1805	4,1801	4,1797	4,1793	4,1790	4,1787	4,1785	4,1783
30	4,1782	4,1781	4,1780	4,1780	4,1779	4,1779	4,1780	4,1780	4,1781	4,1782
40	4,1783	4,1784	4,1786	4,1788	4,1789	4,1792	4,1794	4,1796	4,1799	4,1801
50	4,1804	4,1807	4,1811	4,1814	4,1817	4,1821	4,1825	4,1829	4,1833	4,1837
60	4,1841	4,1846	4,1850	4,1855	4,1860	4,1865	4,1871	4,1876	4,1882	4,1887
70	4,1893	4,1899	4,1905	4,1912	4,1918	4,1925	4,1932	4,1939	4,1946	4,1954
80	4,1961	4,1969	4,1977	4,1985	4,1994	4,2002	4,2011	4,2020	4,2029	4,2039
90	4,2048	4,2058	4,2068	4,2078	4,2089	4,2100	4,2111	4,2122	4,2133	4,2145

Количество теплоты, воспринятое горячим теплоносителем (КПД=0,94):

$$Q_2 = G_2 \cdot C_p \cdot (t_2'' - t_2') \cdot 0,94 = \frac{715,37}{3600} \cdot 4,1936 \cdot (13,07 - 6,23) \cdot 0,94 = 5,358 \text{ кВт}$$

G_2 – расход холодного теплоносителя, кг/ч

C_p – удельная теплоемкость теплоносителя, кДж/(кг·К), определялось по таблице 5

t_2', t_2'' - температура холодного теплоносителя на входе и выходе из аппарата

Средняя разность температур:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{\ln(\Delta t_6 / \Delta t_M)} = \frac{27,09 - 11,57}{\ln(27,09 / 11,57)} = 18,24^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_6 = 27,09^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_M = 11,57^\circ\text{C}$$

Критерий Рейнольдса Re_1 :

$$Re_1 = \frac{w \cdot d}{\mu} = \frac{0,037 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{1,22 \cdot 10^{-6}} = 154$$

Критерий Нуссельта при условии конденсации пара определяют по формуле:

$$Nu = 0,135 \cdot Re^{0.73} \cdot Pr^{0.43} = \frac{\alpha \cdot d_3}{\lambda_1}$$

Коэффициент теплоотдачи от пленки конденсата к стенке:

$$\frac{\alpha_2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{0,602} = 0,135 \cdot 154^{0.73} \cdot 5,5^{0.43}$$

$$\alpha_1 = 1741 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Критерий Рейнольдса Re_2 :

$$Re_2 = \frac{w \cdot d}{\mu} = \frac{0,0227 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{1,45 \cdot 10^{-6}} = 78,5$$

$$Pr_2 = 10,1$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде α_2 :

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_3}{\lambda_2} = 0,135 \cdot Re^{0.73} \cdot Pr^{0.43}$$

$$\frac{\alpha_2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{0,572} = 0,135 \cdot 78,5^{0.73} \cdot 10,1^{0.43}$$

$$\alpha_2 = 1008 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Коэффициент теплопередачи K :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{1741} + \frac{0,0005}{15} + \frac{1}{1008}$$

$$K = 625,08 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Расчетная поверхность теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{cp}} = \frac{5700}{625,08 \cdot 18,24} = 0,5 \text{ м}^2$$

Заключение

В Выпускной квалификационной работе была исследована эффективность использования кавитационных процессов для конденсации пара.

Были рассмотрены все виды струйных конденсаторов и определено, что кавитационный конденсатор по устройству и принципу работы больше всего схож с эжекторным конденсатором.

Был рассмотрен экспериментальный стенд по изучению процесса кавитации, описано оборудование входящее в установку и обоснована установка данного оборудования в стенд.

В работе был описан принцип работы установки, это было сделано для того, чтобы показать последовательность действий для правильного проведения эксперимента, соблюдения необходимых мер безопасности и правильной эксплуатации кавитационного стенда, для того, чтобы избежать быстрого износа или выхода из строя оборудования.

Проводились эксперименты по определению производительности кавитационного конденсатора, для более точного анализа эксперименты проводились при разной температуре в стенде. По результатам экспериментов были построены графики зависимостей.

Из анализа графиков и данных, можно сделать вывод, что кавитационные явления возможно использовать для конденсации пара. Однако параметром, ограничивающим производительность кавитационного конденсатора в проведенных экспериментах, являлась скорость пара в паропроводе. Из-за большого количества гидравлических потерь в кавитационном стенде поток воды не может достичь определенной скорости, необходимой для более эффективного процесса конденсации.

Список использованных источников

- [1] Эйзенберг П.О. механизме возникновения кавитации // Механика. – М.: ИЛ, 1958. № 5 (51).
- [2] Корнфельд М. Упругость и прочность жидкостей. – М. - Л.: ГИТТЛ, 1951. – 107 с
- [3] Ивченко В.М., Кулагин В.А., Немчин А.Ф. Кавитационная технология; ред. акад. АН УССР Г.В. Логвинович. - Красноярск: Изд-во КГУ, 1990. - 200 с
- [4] Акуличев В. А. Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях. М.: Наука, 1978. 280с.
- [5] Биркгоф Г., Сарантонелло Э. Струи, следы и каверны. пер. с англ. М.: Мир, 1964. 466с.
- [6] Арзуманов Э.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. М.: Энергия, 1978. 304 с..
- [7] Мачинский А.С. Гидродинамические и теплообменные характеристики суперкавитационных испарительных аппаратов для обессоливания жидкостей. [Электронный ресурс]. Дис. ... канд. технические науки: 05.17.08. М.: РГБ, 2007. (Из фондов Российской государственной библиотеки).
- [8] Федоткин И.М. Кавитация, кавитационная техника и технология их использования в промышленности. Ч.П./ И.М. Федоткин, И.С. Гулый. – Киев: ОКО, 2000. – 898 с.
- [9] Федоткин И.М. Использование кавитации в технологических процессах / И.М. Федоткин, А.Ф. Немчин. – Киев: Вища шк., 1984. – 68 с.
- [10] Федоткин И.М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности / И.М. Федоткин, И.С. Гулый. – Ч. II. – Киев: ОКО, 2000. – 898 с.
- [11] Бродов Ю.М., Савельев Р.З. Конденсационные установки паровых турбин: учебное пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.

[12] Александров И.А. Перегонка и ректификация в нефтепереработке. - М.: Химия, 1981. - 352 с.

[13] Соколов Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.

[14] Берман С.С. Теплообменные аппараты и конденсационные устройства турбоустановок. М., 1959. 423 с.

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Теплотехника и гидрогазодинамика

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой


В.А. Кулагин

подпись

« 26 » июня 2023г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

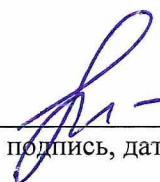
13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

код – наименование направления

Определение режима работы и производительности

кавитационного конденсатора

Руководитель


подпись, дата

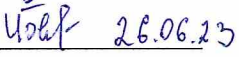
к.т.н., доцент каф. ТТиГГД

должность, ученая степень

А.Ю. Радзюк

инициалы, фамилия

Выпускник


подпись, дата

И.В. Белов

инициалы, фамилия

Красноярск 2023