

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Политехнический

---

институт  
Теплотехники и Гидрогазодинамики

---

кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В. А. Кулагин  
подпись инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Система автоматического регулирования кавитационной гидродинамической  
установки

---

тема

13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

---

код и наименование направления

13.04.01.01 Энергетика теплотехнологий

---

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель

к.т.н., доцент

А.Ю. Радзюк

подпись, дата

должность, ученая степень

инициалы, фамилия

Выпускник

П.В. Павлов

подпись, дата

инициалы, фамилия

Красноярск 2020г.

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация на тему «Система автоматического регулирования кавитационной гидродинамической установки» содержит 86 страниц текстового документа, 21 рисунок, 4 схемы, 1 таблицу, 28 формул, 48 использованных источника.

Кавитация, жидкие теплоносители, экспериментальная установка.

Объекты исследования – гидродинамическая кавитационная установка.

Целью работы являются создания автоматической системы для сбора, анализа и обработки данных, полученных в результате эксперимента.

Проведена сравнительная характеристика методов исследования кавитации.

Приведены физические основы кавитационных процессов.

В соответствии с заданием в магистерской диссертации был выполнен анализ гидродинамической установки на предмет ее автоматизации, предложена замена устаревших датчиков на современные, с более высоким качеством исполнения и низкой погрешностью измерения, отечественных производителей. Автоматическая система управления технологическим процессом реализована на базе программируемого контроллера ОВЕН ПЛК-154.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1 Физические основы кавитационных процессов</b> .....	8
1.1 Возникновение кавитация .....	8
1.2 Кавитационная прочность .....	9
1.3 Математическая модель схлопывания пузырька .....	12
1.4 Рост и схлопывание кавитационного пузырька .....	13
1.5 Термодинамика пузырьков и тепловой механизм возникновения кавитации .....	21
<b>2 Применение кавитационных технологий</b> .....	24
2.1 Кавитационные аппараты .....	24
2.2 Исследование кавитационнообработанных материалов .....	28
2.3 Способы, позволяющие получать кавитацию .....	29
<b>3 Методы исследования кавитации в технологических установках</b> .....	31
3.1 Гидравлические методы исследования кавитации в местных сопротивлениях .....	32
3.2 Акустические методы исследования кавитации в местных сопротивлениях .....	34
3.3 Электрические методы исследования кавитации .....	38
3.4 Радиоактивные методы исследования кавитации .....	40
3.5 Визуальные наблюдения, фотографирование и киносъемка .....	43
3.6 Методы и приборы для измерения растягивающих напряжений в жидкости .....	44
<b>4. Анализ экспериментального объекта, как объекта автоматизации</b> ..	58
4.1 Экспериментальная установка .....	59
4.2 Определение основных рабочих параметров .....	65
4.3 Функциональные задачи .....	66
4.3.1 Обоснование выбора технических средств АСУТП .....	66
При выборе технических средств для АСУТП, необходимо учесть .....	66
4.4 Системные требования .....	67
4.4.1 Экономические требования .....	67
4.4.2 Монтажно-эксплуатационные требования .....	67
4.4.3 Выбор технических средств АСУ ТП .....	68

4.4.4	Выбор контроллера ОВЕН ПЛК154 .....	68
4.4.5	Выбор программного обеспечения .....	70
4.5	Разработка графического интерфейса .....	70
4.5.1	Пакет SCADA ОВЕН Телемеханика ЛАЙТ .....	70
<b>5.</b>	<b>Содержательное описание исполнительного устройства .....</b>	<b>73</b>
5.1	Формализация концептуальной модели .....	74
5.1.1	Составление аналитической модели системы автоматического управления уровнем жидкости в ресорбере.....	74
5.1.2.	Модель объекта регулирования.....	74
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>		<b>80</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>		<b>82</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

Гидродинамическая кавитация в жидкости, обусловленная резким падением абсолютного давления при увеличении скоростного напора в сжатом сечении потока, имеет локальный характер.

Поскольку гидродинамическая кавитация является сложным многопараметрическим процессом, для решения практических задач широко применяются экспериментальные методы, основанные на проведении необходимых измерений в лабораторных условиях на моделях. Данная тема актуальна в наши дни, поскольку результаты, полученные на лабораторных установках, позволяют улучшить эффективность работы реальных технологических установок.

Под автоматизацией производственных процессов следует понимать применение приборов, приспособлений и устройств, обеспечивающих работу, сбор, подготовку и передачу данных эксперимента, без участия человека, а лишь под его контролем. Автоматизация производственных процессов является высшей формой развития техники, предусматривающей применение передовой технологии, высокопроизводительного и надежного оборудования.

**Целью данной работы является:**

создания автоматической системы для сбора, анализа и обработки данных, повышения точности, качества и удобства снятия показаний в реальном времени всего комплекса величин гидродинамической установки для изучения процесса кавитации полученных в результате эксперимента.

**В качестве объектов исследований** выбрана гидродинамическая кавитационная установка. В качестве среды выбрана водопроводная вода.

**В работе решаются следующие задачи:**

1. Определение методов исследования кавитации в технологических установках.
2. Обоснование выбора схемы автоматизации экспериментальной установки.
3. Выбор оборудования и средств измерений.
4. Формирование математической модели объекта регулирования

### **Актуальность работы**

Обусловлена необходимостью повышения обеспечения точности, качества и удобства снятия показаний в реальном времени всего комплекса величин гидродинамической установки для изучения процесса кавитации.

В настоящее время известно множество способов определения числа кавитации жидкостей, большинство из которых имеет не только достаточно похожие друг на друга результаты, но и высокую стоимость и трудозатратность способа определения. Таким образом стоит задача до максимума упростить и улучшить методику определения числа кавитации при этом достигнув результатов очень близких ранее полученным.

Полученные данные позволят сделать вывод о возможности использования установки для исследований кавитационных процессов и вывода результатов на ПЭВМ и дальнейшей работы с результатами эксперимента.

# **1 Физические основы кавитационных процессов**

## **1.1 Возникновение кавитация**

Кавитация была впервые обнаружена при изучении быстрого движения твердых тел внутри жидкости. Огромную разрушающую силу этого явления почувствовали в первую очередь инженеры, испытывающие гребные винты судов.

Вопросы возникновения и развития кавитации, являющейся одной из актуальных проблем гидродинамики, рассмотрены в большом количестве работ. Были проведены теоретические и экспериментальные исследования Л. А. Эпштейном, К.К. Шальневым, М. И. Гуревичем, В. Я. Карелиным, А. Д. Перником и др.

Технология гидродинамической кавитационной обработки жидких сред с успехом применяется для интенсификации тепло-массообменных и физико-химических процессов, а также улучшения выходных показателей качества процессов гомогенизации и диспергирования.

Выделим основные направления использования кавитационной жидкости:

1) В процессе работы гидродинамических генераторов, насосов в воде возникают высокоэнергетические эффекты («холодное кипение» или «кавитация»). В связи с этим тщательные исследования свойств получаемой «кавитационной» воды несомненно необходимы, поскольку вода является сложным и во многих отношениях малоизученным веществом. В тоже время вода играет основную роль в физиологических процессах, происходящих в клетках живых организмов.

2) Кавитационная вода используется при производстве строительных материалов в качестве «воды затворения». Для эффективности ее применения, нужно знать ее свойства.



3) При добыче нефти и ее обработке, а также промывке скважин используют буровые растворы – сложные многокомпонентные дисперсные системы суспензионных, эмульсионных и аэрированных жидкостей. Такие растворы можно готовить с применением кавитационной воды, что позволит увеличить эффективность их использования. Как и в предыдущих случаях для этого необходимо знать свойства активированной воды.

Так как аналитически затруднительно изучать кавитационные свойства, разрабатывается большое количество экспериментальных установок. Не все они просты в реализации и выгодно экономически, поэтому существует задача максимально упростить и удешевить экспериментальные установки, что в свою очередь положительно скажется на стоимости конечных продуктов.

## **1.2 Кавитационная прочность**

Частицы рабочей жидкости (жидкости, в объёме которой присутствуют мелкодисперсные пузырьки нерастворённого газа и механические примеси), заполняющей некоторый объём камеры, удерживаются вместе силами внешнего абсолютного давления и межмолекулярного воздействия, при этом объём жидкости может быть полностью или частично ограничен твёрдыми стенками камеры. Гидроцилиндр представляет собой замкнутую камеру, в которой жидкость ограничена поршнем, боковой цилиндрической поверхностью и дном (крышкой) гидроцилиндра. Сосуд без крышки представляет собой открытую камеру, в которой жидкость ограничена дном и стенками сосуда, а также поверхностью раздела «жидкость-газ».

Снижение абсолютного давления в жидкости, определяющего величину напряжения сжатия, возможно двумя способами:

- в открытой камере уменьшение напряжения сжатия достигается путём создания вакуума на поверхности жидкости (поверхностное вакуумирование);

- в замкнутой камере аналогичный эффект может быть достигнут путём увеличения объёма поршневой полости при выдвигании штока в условиях прилипания жидкости к поршню и дну цилиндра.

В обоих случаях появление в жидкости растягивающих усилий (напряжений растяжения) возможно только тогда, когда абсолютное давление станет алгебраически меньше нуля, т.е. станет растяжением [16, 17]. В дальнейшем, под разрывной прочностью жидкости будем понимать такое абсолютное давление, создаваемое в жидкости одним из упомянутых выше способов, в условиях которого жидкость перестаёт быть сплошной средой и из неё начинают выделяться паровые, газовые или парогазовые пузырьки.

Именно абсолютным давлением начала выделения пузырьков будет оцениваться разрывная прочность реальной жидкости, хотя можно прогнозировать уменьшение абсолютного давления при полном разрыве сплошности среды. В реальной, специально не подготовленной рабочей жидкости, всегда присутствует растворённый и нерастворённый газ или смесь газов (воздух). В идеальной, полностью дегазированной и очищенной от механических примесей жидкости, в которой частицы могут находиться рядом только под воздействием сил межмолекулярного взаимодействия в условиях нулевого значения внешнего абсолютного давления, разрыв жидкости в замкнутой камере возможен лишь в том случае, когда внешнее растягивающее усилие, создаваемое поршнем с прилипшей к нему жидкостью, а также приведённая к единице площади поршня сила поверхностного натяжения в условиях полной смачиваемости стенки, превысят удельную силу межмолекулярного взаимодействия и жидкость начнёт вести себя как жидкий стержень.

В расчётах гидравлических систем управления принято допущение, при котором рабочая жидкость разрывается при абсолютном давлении равном или близким к давлению насыщенных паров [18]. В реальных рабочих жидкостях, в частности в маслах на минеральной основе, в которых

в той или иной степени присутствует как растворённый в

межмолекулярном пространстве, так и нерастворённый в виде мельчайших пузырьков воздуха, разрыв жидкости произойдет при более высоких значениях абсолютного давления (меньшем значении вакуума).

Растворённый воздух, который сам по себе не влияет на разрывную прочность жидкости, при понижении абсолютного давления, в соответствии с законами Дальтона и Генри, покидает межмолекулярное пространство и становится генератором кавитационных ядер -мельчайших пузырьков нерастворённого воздуха, которые, укрупняясь, превращаются в каверны. Микронеровности и трещины на поверхности твёрдых стенок камеры, а также частицы механических примесей, играют роль слабых точек, в которых образуются и удерживаются ядра разрывных полостей.

Увеличение размеров пузырька может происходить с умеренной скоростью, если оно обусловлено диффузией в него растворённого в жидкости газа, или медленным объёмным расширением жидкости, вызывающим понижение в ней абсолютного давления. Спонтанное развитие парогазовых каверн происходит, когда внутрь пузырька врывается пар. В технической гидродинамике под кавитацией подразумевают развитие пузырьков при гидродинамическом понижении абсолютного давления, связанного с увеличением скоростного напора в сжатом сечении потока в соответствии с уравнением Д. Бернулли: не корректно термином кавитация заменять понятие кипения жидкости в открытой камере, вызванное ростом пузырьков под действием температуры и повышением давления насыщенных паров до значения абсолютного давления на поверхности жидкости. Рост пузырьков, обусловленный диффузией в них растворённого в жидкости газа при статическом или динамическом понижении абсолютного давления и последующее удаление этих пузырьков из жидкости, называется дегазацией (деаэрацией применительно к воздуху).

Согласно элементарной теории кавитации разрыв идеальной жидкости, т.е. первая фаза кавитации, связанная с образованием каверн, начинается,

когда местное абсолютное давление в жидкости падает до значения давления насыщенных паров и обусловлен процессом испарения. В реальной рабочей жидкости величина абсолютного давления начала кавитации больше, что связано с наличием в жидкости устойчивых кавитационных ядер. Таким образом, первая фаза кавитация характеризуется разрывной прочностью жидкости при заданной температуре, она вторична по отношению к стадии разрыва жидкости, количественно связана с испаряемостью жидкости или спонтанным расширением пузырька нерастворённого газа. Давление насыщенных паров, при котором полностью дегазированная жидкость претерпевает разрыв, является мерой внутреннего напряжения, возникающего в момент разрыва. При очень быстром, практически мгновенном разрыве дегазированной жидкости, алгебраическая величина абсолютного давления становится меньше нуля и в жидкости возникают кратковременные напряжениярастяжения.

### **1.3 Математическая модель схлопывания пузырька**

В замкнутой камере нарушение сплошности среды определяется напряжениями, связанными с прочностью жидкости на разрыв, если сила прилипания жидкости к твёрдой стенке больше разрывного усилия, или отрывом жидкости от стенки (пристеночная кавитация). Если смачиваемость недостаточна для удержания слоя жидкости на стенке (гидрофобные поверхности), то кавитационные ядра образуются на поверхности стенки раньше, чем наступает первая фаза кавитации в объёме жидкости, и разрыв наступает при более высоких значениях абсолютного давления. В случае полного отсутствия нерастворённого воздуха, разрывная прочность при медленном понижении абсолютного давления определяется только испаряемостью жидкости, она приобретает более высокую прочность на разрыв, если была предварительно подвергнута опрессовке под высоким давлением с последующей дегазацией.

Как было отмечено выше, в жидкости, находящейся в абсолютном покое в поле силы тяжести, долгое время могут присутствовать мелкодисперсные пузырьки нерастворённого воздуха, размеры которых не превышают 1-2 мкм и которые не могут всплыть под действием естественной флотации, условия которой определяются плотностью и вязкостью жидкости. В тоже время, диаметры пузырьков должны быть достаточно малыми, чтобы давление внутри пузырька, определяемое коэффициентом поверхностного натяжения и размерами пузырька, было выше давления, при котором жидкость была насыщена газом. Если присутствует физическая возможность естественной флотации, то разрывную прочность жидкости можно оценивать двумя величинами: абсолютным давлением начала зарождения видимых невооружённым глазом пузырьков и абсолютным давлением, при котором начинается их естественная флотация или спонтанное развитие каверн.

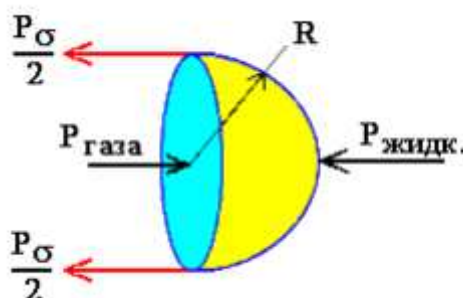


Рисунок 1 - Динамика парогазового пузырька

#### 1.4 Рост и схлопывание кавитационного пузырька

Проблемы, связанные с развитием ядра и его превращением, в каверну, были впервые рассмотрены Рэлеем [19] и затем подробно изучены Кнэппом [16]. Пренебрегая силой тяжести газа, заполняющего пузырёк, статическое равновесие пузырька можно представить уравнением:

$$P_{\text{жид.}} + P_\sigma - P_{\text{газа}} = 0, \quad (1.1)$$

где  $P_{\text{жид.}} = p_0 \pi R^2$  — сила давления жидкости на криволинейную

поверхность полусферы;

$$P_{\sigma} = 2\pi R\sigma - \text{сила поверхностного натяжения};$$

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;

$$P_{\text{газа}} = P_{\text{пп.ст.}} = (p_{\text{пара}} + p_{\text{газа}})\pi R^2 - \text{сила давления насыщенного пара и}$$

нерастворённого газа на газовую плоскую стенку;

$p_0$  – давление жидкости на поверхности

пузырька;

$p_{\text{пара}}$  – давление насыщенного пара при заданной температуре;

$p_{\text{газа}}$  – парциальное давление газа;

$R$  – радиус сферической поверхности пузырька.

После подстановки значений сил уравнение (1.1) в напряжениях принимает вид:

$$p_0 = p_{\text{пара}} + p_{\text{газа}} - 2\sigma/R. \quad (1.2)$$

Если газ, заполняющий сферический пузырёк, считать совершенным, давление насыщенного пара  $p_{\text{пара}} = p_{\text{пара}}(T)$ , (где  $T$  – абсолютная температура) независимым от радиуса, а процесс диффузии через границу раздела «газ-жидкость» постоянным, то состояние газа определяется уравнением Менделеева –Клапейрона:

$$p_{\text{пара}} = MR_{\text{г}}T/V = 3MR_{\text{г}}T/4\pi R^3 = NT/R^3, \quad (1.3)$$

где  $N = 3MR_{\text{г}}/4\pi$  – постоянная фиксированной массы газа в объёме пузырька;

$R_{\text{г}}$  – газовая постоянная;

$V$  – объём сферического пузырька.

После подстановки давления (1.3) в уравнение (1.2) получим:

$$p_0 = p_{\text{пара}} + \frac{NT}{R^3} - \frac{2\sigma}{r_0}. \quad (1.4)$$

Допуская радиальное движение жидкости относительно центра пузырька безвихревым (от центра при растяжении пузырька и к центру при его сжатии) и имеющим потенциал скорости движения жидкости относительно центра пузырька можно выразить через потенциал скорости.

$$U = -\frac{\partial\varphi}{\partial t} = \frac{R^2}{r^2} \cdot \frac{dR}{dt}, \quad (1.5)$$

где  $\frac{dR}{dt} = u_0$  – радиальная скорость расширения (сжатия) поверхности пузырька, равная скорости движения жидкой частицы, лежащей на стенке пузырька. Пренебрегая силой тяжести массы газа внутри пузырька и принимая плотность частицы жидкости квазистационарной  $\rho = \text{inv}$ , уравнение движения жидкости представим в виде:

$$-\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \frac{p_{\infty}}{\rho}, \quad (1.6)$$

где  $p = p(r, t)$  – местное давление в жидкости, находящейся в окрестностях пузырька;

$p_{\infty} = p(t)$  – давление в жидкости, достаточно удалённой от поверхности пузырька с  $u = 0$ ,  $\varphi = 0$ . На радиусе  $r = R$  частица жидкости движется под действием сил давления с радиальной скоростью, равной скорости движения стенки пузырька  $u$ .

$$-R \frac{du_0}{dt} - \frac{3u_0^2}{2} = \frac{p_\infty - p_0}{\rho_0}. \quad (1.7)$$

Совместное решение уравнений 1.4, 1.6, 1.7 определяет выражение результирующей силы, под действием которой изменяется радиус пузырька.

При этом устанавливается баланс напряжений:

$$p_{\text{пара}} - p_\infty + \frac{NT}{R^3} - \frac{2\sigma}{R} = 0, \quad (1.8)$$

$$F(R, T) = \rho \left( R \frac{du_0}{dt} + \frac{3u_0^2}{2} \right) = p_{\text{пара}} - p_\infty + \frac{NT}{R^3} - \frac{2\sigma}{R},$$

при этом радиус пузырька принимает равновесное значение  $R = R_e$ .

Если  $F(R, T) > 0$ , то пузырёк расширяется, а при  $F(R, T) < 0$  – сжимается.

В соответствии с равенством (1.8) пузырёк может расти с умеренной скоростью в пяти случаях:

- при диффузии растворённых газов через стенку пузырька ( $N > 0$ );
- при расширении содержащегося в пузырьке газа, обусловленном повышением температуры ( $T > 0$ );
- увеличении давления насыщенных паров, вызванным нагревом жидкости
- при ( $p_{\text{пара}} > 0$ );
- при появлении в жидкости растягивающих напряжений ( $\sigma_{\text{раст.}} = -p > 0$ ).

В соответствии с принятым понятием кавитации, её растягивающим напряжением и равенство (2.8) принимает вид:

$$\sigma_{\text{раст.}} = 2\sigma/R_e - p_{\text{пара}} - NT/R_e^3, \quad (1.9)$$

где, как и прежде,  $R_e$  – равновесный радиус пузырька.

В сечении, удалённом от зоны дросселирования, давление жидкости



может быть достаточно большим, а радиус пузырька малым из-за растворения газа в жидкости в соответствии с законом Генри:

$$V_r = \alpha V_{ж} p_{газа} / p_{атм.}, \quad (1.10)$$

где  $V_r$  – приведённый к атмосферному давлению  $p_{атм.}$  объём газа, который может раствориться в объёме жидкости  $V_{ж}$  под давлением  $p_{газа}$ .

Принимая для минеральных масел при  $T = 293 \text{ K} (T = 20 \text{ }^\circ\text{C})$ ;  $p_{газа} = p_{пара} = 1000 \text{ Па}$ ;  $\sigma = 0,1 \text{ Н/м}$  и

начальный радиус ядра  $R_e = R_{min} = 0,01 \text{ мкм} = 10^{-8} \text{ м}$ , что на порядок больше наблюдаемого размера пузырька  $R = 10^{-9} \text{ м}$ , отмеченного в работе [20], можно оценить порядок величины напряжения растяжения жидкости в начальной стадии кавитации  $\sigma_{раст.} = 2/R_e - 2p_{пара} = 20 \text{ МПа}$ . Рост

пузырька прекращается, когда начинает выполняться условие  $\sigma_{раст.} = 0$  и при  $p_{газа} = p_{пара} = 1000 \text{ Па}$  устанавливается равновесный радиус пузырька.

$$R_e = R_{max} = 0,1 \text{ мм.}$$

При сравнительно небольшой скорости движения стенки пузырька в процессе его расширения  $dR_e > 0$ , поглощаемое газом тепло компенсируется подводом тепла и окружающей жидкости и процесс расширения газа близок к изотермическому жидкости и процесс расширения газа близок к изотермическому:

$$R_e^3 = p_{газа_{max}} \cdot R_{min}^3, \text{ или } p_{газа} = p_{газа_{max}} \cdot \left( R_{min} / R_e \right)^3 = p_{газа_{max}} \cdot (R^*)^3,$$

Где  $R^* = R_{min} / R_e$  – безразмерный радиус пузырька.

Подставляя в уравнение (1.2) начальное значение давления газа в пузырьке

$p_{\text{газа,max}}$  при  $R = R_{\text{min}}$ , получим  $p_{\text{газа,max}} = p_0 - p_{\text{пара}} + 2/R_{\text{min}} = p_{\text{газа}}/(R^*)^3$  и

снижение давления газа в пузырьке при его

расширении  $p_{\text{газа}} = \left( p_0 - p_{\text{пара}} + 2/R_{\text{min}} \right) \cdot (R^*)^3$ , где  $p_0$  — давление

жидкости на поверхности пузырька.

В соответствии с выражением (3.8) равновесное давление в жидкости, достаточно удалённой от поверхности пузырька, подчиняется зависимости

$$p_{\infty} = p_{\text{пара}} + \left( p_0 - p_{\text{пара}} + 2\sigma/R_{\text{min}} \right) \cdot (R^*)^3 - 2\sigma/R_e. \quad (1.11)$$

При быстром движении стенки при расширении пузырька ( $dR_e > 0$ ) процесс теплообмена между расширяющимся газом и окружающей его жидкостью прекращается и уравнение состояния газа соответствует адиабатическому закону с показателем политропы  $k = 1,4$ . В этом

случае  $p_{\text{газа}} = p_{\text{газа,max}} \cdot \left( R_{\text{min}}/R_e \right)^{3k} = p_{\text{газа,max}} \cdot \left( R_{\text{min}}/R_e \right)^{4,2}$ .

Вязкость жидкости демпфирует рост ядра кавитации и замедляет флотацию, что приводит к длительному существованию ядер кавитации в вязких жидкостях. Растворённый в жидкости воздух сам по себе не оказывает влияние на её разрывную прочность [21]. При благоприятных условиях время образования каверны достаточно мало (примерно 5 мс) и его недостаточно для активной диффузии растворённого воздуха через жидкость к поверхности раздела «каверна-жидкость». При быстром закрытии каверны содержащийся в ней воздух не успевает полностью раствориться, а его избыток при дроблении каверны идет на генерирование новых ядер и активизацию кавитации. В работе [20] отмечается, что объём каверны при первом повторном её зарождении составляет 65 % объёма первообразной каверны, что приводит к образованию не одной вторичной каверны того же

размера, а к сообществу более мелких пузырьков.

О роли растворённого воздуха. В соответствии с законом Дальтона [18] в единице объёма жидкости  $V_{ж}$  может находиться строго определённое количество растворённого воздуха  $V_{в}$  до её полного насыщения:

$$V_{в} = \alpha \cdot \frac{V_{ж} \cdot p_1}{p_1 - \Delta p}, \quad (1.12)$$

где  $\alpha$  – коэффициент растворимости (для воздуха в минеральном масле  $\alpha = 0,10$ );

$p_1$  – давление газа при полном насыщении жидкости;

$\Delta p$  – уменьшение давления до нового уровня, при этом под  $V_{в}$  подразумевается объём воздуха при атмосферном давлении, который может раствориться в жидкости при повышении первоначального давления на величину  $p > 0$ , или выделиться из жидкости в виде процесса насыщения жидкости воздухом в объёме  $V_{ж}$  характеризуется соотношением  $S/V_{ж}$ , где  $S$  – площадь поверхности раздела двух сред. Скорость растворения воздуха не постоянна: 25 % возможного объёма  $V_{в}$  растворяется практически мгновенно из-за насыщения диффузии. При резком нарастании давления  $\Delta p > 0$  мелкие и средние пузырьки растворяются практически мгновенно. Выделение растворённого воздуха из жидкости поверхностных слоёв жидкости, а остальные 75 % растворяются в процессе медленной более интенсивно, по сравнению с его растворением при том же значении  $p$ . Особенно интенсивным является выделение растворённого воздуха при кавитации в узких щелях дросселирующих устройств. С учётом вышеизложенного, альтернативный процесс сжатия и расширения жидкости с последующей её кавитацией при резком понижении гидродинамического давления приводит к образованию двухфазной среды «жидкость-нерастворённый воздух».

Кавитационный пузырьёк за время своей жизни проходит две важнейшие стадии - рост и схлопывание. В большинстве случаев эти процессы происходят с разной скоростью, причём эта разница принципиальна и обуславливает многие особенности кавитации.

Рост кавитационного пузырька почти всегда происходит намного медленнее, чем его схлопывание — и чем выше напор жидкости, тем больше эта разница. Дело в том, разрыв потока определяется «отрицательным» давлением, то есть разрывающими усилиями, возникающими в толще жидкости. Для сверхчистых жидкостей в специальных условиях эти усилия могут достигать весьма существенных величин, однако в обычных условиях, да ещё в движущемся потоке, жидкость рвётся почти без усилий. С учётом того, что перед разрывом все части жидкости в ближайших окрестностях точки разрыва имели практически одинаковую скорость, их расхождение будет достаточно медленным, что ограничивает скорость роста каждого отдельного пузырька. Если условия требуют более интенсивного роста, то это будет компенсироваться увеличением количества точек разрыва, т.е. большим дроблением жидкости — вплоть до превращения её в пену, — но сами образующиеся пузырьки будут иметь примерно один и тот же размер. По мере дальнейшего роста в зависимости от расположения исходных «точек разрыва», эти пузырьки могут разрастаться и объединяться. При стабилизации кавитационных условий возможна «перегруппировка» пузырьков, когда часть из них исчезнет, а оставшаяся часть увеличится в размерах, однако этот процесс потребует достаточно заметного времени, исчисляемого как минимум несколькими миллисекундами. Когда условия для кавитации пропадают и внешнее давление начинает нарастать, стенки пузырька устремляются навстречу друг другу. Этот процесс прямо определяется внешним давлением, и чем оно выше, тем больше сила, действующая на стенки, тем больше их ускорение. Поскольку максимальная скорость передачи механических воздействий в жидкости определяется скоростью распространения в ней звука, скорость схлопывания не должна

превысить скорость звука (взаимная скорость в месте схлопывания и определяемая ею сила гидроудара, соответственно, — удвоенную скорость звука). Однако и этого более чем достаточно для достижения фантастических давлений. Оценка по формуле Жуковского для воды даёт давление в точке схлопывания порядка 4 ГПа (примерно 40000 атмосфер, что соответствует напору водяного столба высотой 400 км). Это на один-три порядка превышает пределы прочности почти всех известных материалов, включая сталь, — как на сжатие, так и на растяжение.

Таким образом, можно сказать, что во время роста пузырьков ничего особо экстремального и разрушительного не происходит. Всё самое необычное может происходить лишь в момент схлопывания пузырька. Это подтверждается экспериментальными фактами, например, однозначно установлено, что вспышки при сонолюминесценции происходят именно в момент схлопывания пузырька, а не в период его образования.

Как говорилось выше, ни с механической, ни с термодинамической точки зрения ждать получения дополнительной энергии от кавитации не стоит. Похоже, то же самое относится и к любым другим механизмам в рамках общепринятой физики. Многочисленные опыты и тщательные измерения различных кавитационных генераторов подтверждают это.

### **1.5 Термодинамика пузырьков и тепловой механизм возникновения кавитации**

Безусловно, при образовании и исчезновении кавитационных пузырьков, даже если они возникают «механическим путём» из-за скоростного разрыва потока, происходят термодинамические процессы. Во время роста пузырька жидкость со стенок полости интенсивно испаряется в образующуюся пустоту. В соответствии с классической термодинамикой, это должно сопровождаться существенным охлаждением образовавшегося пара и тончайшего слоя жидкости на границах полости. Однако каков реальный

результат этого процесса. Вследствие охлаждения процесс испарения становится менее интенсивным, а равновесное давление паров жидкости снижается, обеспечивая более высокую степень разрежения внутри пузырька по сравнению с равновесной концентрацией паров для температуры основного объёма жидкости. При исчезновении пузырька происходит обратный процесс — повышение давления и конденсация этих холодных паров с выделением теплоты. В силу короткого времени жизни пузырька, обычно исчисляемого малыми долями секунды, эти процессы можно считать адиабатическими и потому не влияющими на тепловой баланс даже в ближайших окрестностях, за исключением тонкого слоя стенок пузырька. В связи с этим явления испарения и конденсации при кавитации в первом приближении можно исключить из рассмотрения как малозначащие, а связанные с ними термодинамические эффекты считать несущественными, по крайней мере, для одиночных пузырьков с малым временем жизни.

В результате наиболее значимыми остаются лишь механические аспекты кавитации, — а они оказываются теми же самыми, что характерны для обычного гидроудара. Это образование области пустоты из-за скорости и несжимаемости жидкости (а, следовательно, и её нерастягиваемости без разрыва), и повышение давления при «схлопывании» пузырька из-за скоростного напора его сходящихся стенок. Если же время жизни пузырька достаточно велико (зона кавитации имеет большую протяжённость), его объём действительно может заполниться парами до состояния равновесия с жидкостью, но давление этих паров всё равно очень низко, и обычно, по сравнению с давлением на других участках русла потока, им вполне можно пренебречь, приравняв его к вакууму (конечно, это не глубокий «космический» вакуум, но с точки зрения механики разность между перепадами давления в 1.00 и 0.98 атм — 2% — в подавляющем большинстве случаев не имеет никакого значения; при большем давлении жидкости эта разница ещё меньше, например при характерных для водопровода

избыточных давлениях от 2 до 6 атм она составит от 0.7% до 0.3% соответственно).

Иногда упоминают и о другом механизме возникновения кавитационных пузырьков — тепловом. Например, считается, что именно такая кавитация обуславливает шум закипающего чайника или кастрюли. Там под воздействием внешнего тепла на горячей стенке или на дне сосуда создаются условия, позволяющие жидкости перейти в парообразное состояние. Давление при этом достаточно велико — оно равно давлению над поверхностью жидкости в сумме с давлением столба жидкости, соответствующим глубине образования пузырька. Пузырёк пара растёт, за счёт теплоты испарения отбирая «лишнее» тепло у ближайшей к нему жидкости и тем самым предотвращая появление пузырьков-«конкурентов» в своих ближайших окрестностях.

Наконец, объём пузырька становится достаточно велик, чтобы под действием архимедовой силы и локальных течений, которые всегда возникают в объёме жидкости при местном интенсивном нагреве, он смог оторваться от своего места и отправиться в самостоятельное плавание. Удалившись от горячей стенки, он попадает в менее нагретую область жидкости. Эти условия становятся недостаточными для поддержания парообразного состояния жидкости внутри пузырька, поэтому пар остывает, начинается его быстрая конденсация, объём пузырька резко сокращается, и он исчезает.

Следует заметить, что таким образом исчезают лишь достаточно мелкие пузырьки, которые имеют большое соотношение площади поверхности к объёму и потому всплывают не слишком быстро, испытывая относительно большое гидродинамическое сопротивление. В воде даже пузырьки диаметром в полмиллиметра часто не исчезают, а успевают благополучно достичь поверхности воды, если глубина их образования лежит в пределах 50 см, — они имеют достаточно большое соотношение объёма к поверхности, и за счёт этого поднимаются достаточно быстро,

чтобы пар внутри них не успел остыть в нужной степени, а падение давления жидкости по мере подъёма ведёт к дальнейшему росту их объёма и затруднению конденсации. Тем не менее, заранее трудно сказать, какого именно размера пузырьки успеют исчезнуть, а какого — нет. Слишком много факторов действует на этот процесс в реальности, начиная от конструкции и конфигурации нагреваемой ёмкости и заканчивая текущей температурой жидкости и особенностями подвода тепла.

## **2 Применение кавитационных технологий**

### **2.1 Кавитационные аппараты**

Схлопывание кавитационных пузырьков по симметричной схеме сопровождается образованием полей пульсирующих давлений (от 4 до 10 тыс. атм), при асимметричном - образованием ударных кумулятивных микроструек (скорость от 100 до 500 м/с, давление от 1 до 2 тыс. атм). Высокие давления и температуры (до 15 000 К) позволяют протекать реакциям, аналогичным процессам в плазме – синтез органических и неорганических материалов.

Применение кавитационных технологий позволяет получить значительный эффект в энерго- и ресурсосбережении. В [22] представлены наиболее очевидные схемы взаимодействий схлопывающихся микропузырьков и дисперсной фазы.

Основное отличие кавитационных аппаратов, используемых в различных технологиях, состоит в способе возбуждения кавитации в среде жидкого технологического сырья. Принцип действия одних аппаратов основан на использовании акустических колебаний. Работа устройств другого типа основана на гидродинамическом способе возбуждения кавитации.



Мощные ультразвуковые колебания жидкости можно получить с помощью магнестрикционных и пьезоэлектрических преобразователей. При ультразвуковых частотах колебаний вибраторов в жидкости (суспензии) возникает пузырьковая кавитация. Ультразвуковые вибраторы с магнестрикционными и пьезокварцевыми излучателями более сложные по конструкции, чем гидродинамические, обладают низкой производительностью при большем расходе электроэнергии.

Общими недостатками ультразвуковых аппаратов является то, что режимы кавитации выражены недостаточно сильно, причем наибольшая степень развития пузырьковой кавитации наблюдается у поверхностей рабочих органов аппарата. Это приводит к их быстрому износу и неоднородной обработке получаемых смесей. В связи с сильным затуханием ультразвуковых колебаний, особенно в двух- и трехфазных жидких технологических потоках, фокусировка ультразвука, достаточной для генерирования кавитационных пузырьков мощности от 0,5 до 5 Вт/см<sup>2</sup> внутри технологического потока (вдали от рабочих поверхностей аппарата), связана с большими удельными затратами энергии.

Гидродинамические кавитационные аппараты подразделяются на проточные и роторные. В [23, 24] дана подробная классификация этих аппаратов. Рабочую часть проточно-кавитационных реакторов составляет набор установленных в проточной камере кавитаторов (дисков, конусов, сфер, стержней и др.). При обтекании кавитаторов потоком жидкости за ними образуются пузырьковые каверны, в области которых происходит кавитационная обработка технологического сырья. Как известно, пульсации кавитационных пузырьков сопровождаются генерацией акустических колебаний (кавитационным шумом), мощность которых зависит от интенсивности пульсации давлений в кавитационном поле.

Общим элементом в конструкциях различных проточно-кавитационных реакторов является установленный в проточной камере аппарата кавитатор (или набор кавитаторов). Количество кавитаторов, их геометрия,

конструкция, степень подвижности и некоторые другие параметры представляют собой отличительные особенности реакторов и определяются решением конкретных технологических задач:

- снижение энергоемкости реактора, регулирование интенсивности кавитационного поля;
- увеличение степени силового кавитационного воздействия и др.

В наиболее простых конструкциях гидродинамических проточно-кавитационных реакторах используют цельнометаллические кавитаторы, выполненные в виде усеченных конусов, обращенных большими основаниями навстречу потоку жидкости. Кавитаторы устанавливаются в рабочей камере неподвижно и располагаются рядами по концентрическим окружностям, образуя в камере пространственную решетку. Недостаток этих устройств заключается в невозможности регулировать протяженность кавитационного поля. Пульсации давления и скорости в потоке, вызываемые работой насоса, а также изменения параметров самой жидкости (плотности, температуры и др.) существенно влияют на удлинение каверн в рабочей камере, вследствие чего технологические режимы обработки могут отклоняться от оптимальных. Конструктивный учет этих явлений представляет основное направление совершенствования таких реакторов.

Существуют кавитационные аппараты проточного типа, в которых кавернообразование происходит за счет соударения встречных потоков жидкости. С этой целью реактор оборудуется коллектором, расположенным на наружном контуре проточного участка. Коллектор соединяется с трубками-соплами, рядами, расположенными на внутренней поверхности проточной камеры. Жидкость, подаваемая по коллектору, струями истекает из трубок-сопл навстречу основному потоку обрабатываемой жидкости. В результате соударения основного потока со струями по всему поперечному сечению проточного участка образуются пузырьковые каверны. Эксплуатация этих аппаратов отличается сложностью процесса регулирования кавитации в проточной камере, связанной с необходимостью

использования дополнительного регулирования режимных параметров, а именно давления и расхода подаваемой по коллектору жидкости.

С целью регулирования энергии кавитационного воздействия в некоторых конструкциях проточно-кавитационных реакторов используют полые цилиндрические кавитаторы, выполненные из упругого материала. Оси цилиндрических кавитаторов лежат в плоскости поперечного сечения проточного участка. При движении жидкости вдоль реактора полый кавитатор деформируется под действием динамического движения потока. Увеличение скорости течения жидкости приводит к деформации кавитатора с удлинением его по направлению потока, уменьшение скорости потока – к восстановлению его цилиндрической формы. Автоматическое регулирование энергии кавитационного поля за счет использования упругих кавитаторов является существенным преимуществом реакторов подобного типа. Основная сложность их расчета состоит в определении надежной зависимости между упругими свойствами материала кавитатора и гидродинамическими характеристиками деформирующего тела, которая позволяла бы получать в проточной камере кавитатора оптимального удлинения.

Роторные аппараты известны под различными названиями – гидродинамические сирены (ГДС), роторные аппараты с модуляцией потока (РАМП), роторно-пульсационные аппараты (РПА), гидродинамические аппараты роторного типа (ГАРТ), роторно-статорные аппараты, пульсационные аппараты роторного типа (ПАРТ), гидромеханические диспергаторы (ГМД) и др. Конструктивная схема этих аппаратов одинакова. Аппараты содержат основные детали – ротор и статор с каналами в их боковых стенках. Обработываемая среда проходит через периодически перекрывающиеся каналы и выводится из аппарата. В результате, в аппарате на среду оказывают воздействие различные факторы: турбулентные пульсации, механическое воздействие элементов конструкции, сдвиговые напряжения, возникающие в зазорах между ротором и статором, интенсивная

акустическая импульсная и гидродинамическая кавитация, гидравлические удары и т.д. Перечисленные факторы физического воздействия на обрабатываемую среду интенсифицируют химико-технологические процессы, особенно в системах «жидкость–жидкость» и «твердое тело–жидкость». В [25, 26] представлены результаты теоретического и экспериментального исследования гидродинамики течения несжимаемой и сжимаемой жидкостей в рабочих зонах роторного аппарата и их влияние на скорость технологических процессов.

В роторно-пульсационных аппаратах (РПА) режим гидродинамической пузырьковой кавитации и высокоградиентного турбулентного движения достигается в результате периодического (с высокой частотой) перекрытия щелей в системе ротор – статор гидравлической турбины. Одним из примеров роторно-пульсационных аппаратов служит виброкавитационная коллоидная мельница [27].

В основе расчета любого кавитационного аппарата лежит задача об определении его геометрических параметров и гидродинамических характеристик, т. е. о нахождении распределения давлений и скоростей, размеров каверн при обтекании элементов рабочих органов в режимах развитой кавитации. В основу расчета лопастных СК-механизмов положены задачи суперкавитационного обтекания элемента лопасти или плоской решетки профилей, которая эквивалентна решетке лопастного механизма.

## **2.2 Исследование кавитационнообработанных материалов**

Кавитационная вода используется при производстве строительных материалов в качестве «воды затворения». Использование материалов на основе цементных вяжущих средств имеет огромное значение в строительной промышленности, так как значение устойчивости к нагрузке на изгиб бетона увеличивается более чем на 12%. Воздействие кавитации на сырьевые компоненты бетона или смесь оказывает положительное влияние

на характеристики готового изделия. При активировании процесс гидратации вяжущего вещества происходит быстрее и более полно. Скорость и глубина гидратации цемента, условия твердения бетона в раннем возрасте являются решающими факторами, влияющими на темпы набора прочности бетона, его качество, эксплуатационные характеристики, оборот металлоформ, а также на стоимость готовых изделий.

Химическое и физическое модифицирование воды влияет на параметры цементных систем в момент формирования строительных растворов. При этом вода обладает высокой активностью вследствие изменения внутренней энергии, меняется величина  $pH$ , окислительно-восстановительный потенциал, удельная электропроводность и другие параметры. Это даёт возможность управлять процессами, протекающими в цементных системах, но для этого необходимо знать физико-химические свойства самой активированной воды.

### **2.3 Способы, позволяющие получать кавитацию**

Существует много способов, применяемых для получения кавитационных пузырьков. К ним относят воздействие электростатическим зарядом высокой частоты или ультразвуком. Первый случай относится к тепловому, а также механическому эффекту воздействия на жидкость (нагрев с последующим расширением паров). Также кавитационные пузырьки могут появляться вследствие скоростного разрыва жидкости, который происходит под влиянием механических колебаний высокой частоты, вызванных ультразвуком. Из вышесказанного можно сделать вывод, что основными причинами возникновения кавитационных пузырьков являются скоростной (механический) и тепловой (термодинамический) механизмы.

Во многих источниках говорится, что пузырьки появляются за счет растворенных в жидкости газов. Это является неверным утверждением. Если рассматривать пузырьки, образованные вследствие скоростного разрыва

потока, то в них давлению почти равно нулю, близкий вакуум (в лучшем случае – это равновесное давление паров жидкости, успевшее испариться со стенок пузырьков при определенной температуре). Прямые измерения не проводились, потому что, при быстрой скорости движения свободных пузырьков в потоке жидкости, их время существования мало.

Тепловая и механическая кавитации являются разными явлениями.

По факту, скоростная и тепловая кавитации не являются одинаковыми явлениями, хотя и чем-то схожи друг с другом. Главным отличием является разница между давлением и температурой внутри пузырька. Для первого явления давление очень мало, близкое к абсолютному нулю. Температура также низкая, далёкая от температуры кипения жидкости при статическом давлении окружающей среды. Во втором же случае наблюдается высокое давление внутри пузырька, близкое к давлению окружающей жидкости, а также высокая температура, близкая к температуре кипения при этом давлении.

Для тепловой кавитации процесс схлопывания пузырька будет медленным, потому что высокое давление и температура паров внутри будут тормозить этот процесс и дополнительно подпитываться теплом, выделяющимся при конденсации.

В свою очередь, при механической кавитации схлопывание пузырьков происходит относительно быстро. Это связано с тем, что низкое давление, образованное при скоростном разрыве, почти не тормозит процесс. Но этом есть и свои минусы – локальные гидроудары будут более интенсивными, по сравнению с первым способом.

Из вышеперечисленного, можно сделать вывод, что к кавитации относятся лишь пузырьки, образованные при скоростном разрыве. Тепловая кавитация относится к разновидности термодинамических процессов. Неудивительно, что и время роста, и время исчезновения «тепловых» пузырьков как минимум на один-два порядка превышает аналогичные времена при «скоростной» кавитации. Это различие принципиально, так же как принципиальна и практическая безвредность тепловой кавитации. Ни

один чайник и ни одна кастрюля ещё не пострадали от тепловой кавитации как таковой. Накипь для них гораздо опаснее

Вывод: использование кавитационной технологии невозможно без определения прочностей жидкости. При определении точных характеристик жидкости отпадет необходимость использовать необоснованно большие запасы давлений для перемещения и добычи, например, нефти.

### **3 Методы исследования кавитации в технологических установках**

При кавитационных исследованиях местных сопротивлений обычно ставятся следующие задачи:

а) выявление начала возникновения кавитации и критических параметров течения жидкости в зависимости от пограничной геометрии исследуемого объекта, рода жидкости и параметров потока;

б) изучение физики явления кавитации при различных стадиях ее развития;

в) изучение влияния различных стадий развития кавитации на гидравлические, энергетические и эксплуатационные характеристики различных устройств и систем;

г) изучение влияния кавитации на виброакустические характеристики местного сопротивления и системы в целом;

д) исследование эрозионной стойкости материала на различных стадиях развития кавитации и при различных параметрах движущейся жидкости.

В зависимости от целей исследования кавитации применяют ту или иную методику и измерительную аппаратуру.

В настоящее время при изучении возникновения и развития кавитации в местных сопротивлениях используют следующие методы:

а) визуальные и слуховые методы наблюдения;

б) фотографирование и высокоскоростная съемка;

в) гидравлические методы, основанные на изменении параметров потока (расхода, скорости, перепада давлений, гидродинамических усилий и т. п.);

г) акустические методы;

д) электрические (омические, электроемкостные);

е) радиоактивные.

Часто при исследовании кавитации используют одновременно несколько методов. Ниже приводится краткая характеристика методов и приборов, используемых при кавитационных исследованиях местных сопротивлений.

### **3.1 Гидравлические методы исследования кавитации в местных сопротивлениях**

Гидравлические методы основаны на фиксации изменения характеристик потока, наблюдаемого при возникновении и развитии кавитации. Обычно при гидравлических методах определения стадий развития кавитации используются опытные зависимости расхода  $Q$  от перепада давлений  $\Delta p$  или коэффициента сопротивления  $\xi$  от числа кавитации  $x$ . При этом по характерным точкам на кривых находят критические параметры потока, которые используют для определения количественных значений критериев кавитации исследуемого местного сопротивления.

Эксперименты проводятся в условиях поддержания постоянных значений давления либо при постоянном значении  $p_1$  и постепенном уменьшении давления после местного сопротивления  $p_2$ , либо при постоянном значении  $p_2$  и постепенном увеличении давления  $p_1$  при постоянных значениях температуры потока жидкости  $t_i$ .

В качестве примера на рисунке 4.1 показано графическое изображение зависимости  $Q = f(\Delta p)$  для трех степеней открытия регулирующего



органа(где  $S$  и  $S_y$  — соответственно текущее и максимальное значения при различных значениях температуры потока по данным автора [28]. Так как кавитационному течению предшествуют большие скорости движения жидкости, при которых значения числа Рейнольдса  $Re \geq 10^4$ , то бескавитационный режим течения на графиках зависимости  $Q$  от  $|\psi/\Delta p$  характеризуется наклонными прямыми линиями, изображающими область турбулентной автомодельности, когда  $\xi$  не зависит от  $Re$ . Режимные параметры кавитации определяются по точкам перегиба, указанным стрелками.

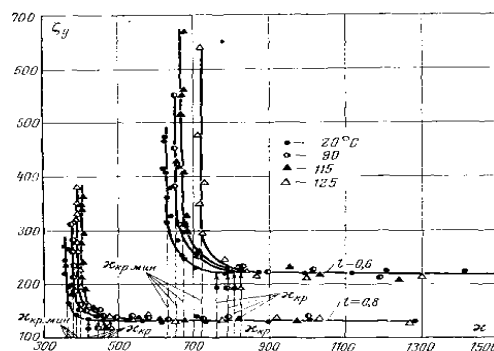


Рисунок 3.1- Зависимость  $Q = f(\Delta p)$  для односедельного регулирующего клапана при направлении потока на плунжер в докавитационном и кавитационном режимах течения

Как видно из этих графиков, правая часть кривых, начиная от точек перегиба, имеет другой характер зависимости: увеличение  $\sqrt{\Delta p}$  не дает существенного роста расхода, а в некоторых случаях после точек перегиба тут же прекращается прирост расхода. В обоих случаях, начиная с определенного значения перепада давлений, расход остается постоянным.

Некоторые исследователи [2, 29] начало кавитации в местных сопротивлениях определяют по точкам излома наклонных прямых линий, а по режимным параметрам, соответствующим этим точкам, вычисляют критические значения числа кавитации.

Режимные параметры, соответствующие началу прекращения прироста

расхода, принимаются как критические параметры кавитации в ее развитой стадии и используются для расчета максимальных достижимых скоростей потока в данном местном сопротивлении. Влияние кавитации на гидравлическое сопротивление можно видеть на рисунке 3.1 - бескавитационное течение характеризуется практически постоянным значением  $\xi$ , которое сохраняется до критического значения числа кавитации  $x_{кв}$ . При  $x < x_{кв}$  коэффициент сопротивления  $\xi$  резко возрастает, этому моменту соответствует минимальное критическое число кавитации  $x_{кв.min}$ .

На рисунке 3.1 значение  $x_{кв}$  соответствует началу отклонения кривой  $Q = f(\Delta p)$  от квадратичного закона, а значение  $x_{кв.min}$  — максимально достижимому расходу через клапан. Таким образом, из зависимости  $Q = f(\Delta p)$  или  $\xi = f(x)$  можно определить критические параметры кавитации гидравлическим методом. Используются также и другие зависимости при определении критических параметров кавитации гидравлическим методом.

### **3.2 Акустические методы исследования кавитации в местных сопротивлениях**

При акустических методах исследования обычно измеряется излучение звуковых импульсов различной частоты и интенсивности, возникающих при различных стадиях возникновения и развития кавитации.

В настоящее время известны следующие методы акустических исследований кавитации в местных сопротивлениях [17].

1) Измерение колебаний давления в жидкости при помощи гидрофонов, позволяющих получить близкие к истинным спектрам кавитационного шума, в том числе получить дискретные составляющие. В качестве примера на рисунке 4.2 показан пьезоэлектрический измерительный гидрофон сферического типа, состоящий из чувствительного пьезоэлектрического элемента 1 в виде полый сферы из керамики титаната бария с

радиальной поляризацией; внутреннего электрода 2 (серебряное покрытие); внешнего электрода 3 (тонкого резинового покрытия) для изоляции внешнего электрода от водной среды и для предохранения его от коррозии.

Сферический чувствительный элемент крепится резиновым виброизолирующим элементом 5 к полуму металлическому стержню 6, электрически соединенному с внешним электродом 3. Проводник от внутреннего электрода 7 проходит внутри стержня 6. С помощью гидрофона такого типа можно измерить звуковые и ультразвуковые частоты, начиная от десятков герц до сотен килогерц, при диаметре чувствительного элемента от нескольких сантиметров до 3-4 мм. Чувствительность шаровых измерительных звукоприемников описанного типа (при тонкостенной керамике) очень высокая. Гидрофоны соединяются с предварительными усилителями с помощью герметического коаксиального соединения 8 [30].

Применение гидрофонов при исследовании местных сопротивлений связано с нарушением поля давлений и известными техническими трудностями, обусловленными вводом гидрофонов внутрь исследуемого объекта. Обычно этот метод используется при изучении некоторых аспектов кавитации, носящих теоретический характер.

2) Измерение вибрации местного сопротивления требует дополнительных установочных площадок, жестко связанных с исследуемым оборудованием, и специальных преобразующих устройств. К положительной стороне этого способа надо отнести ослабление влияния акустического фона помещения.

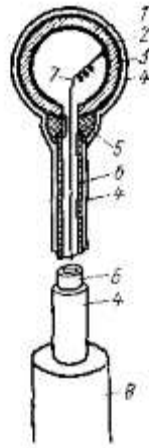


Рисунок 3.2- Пьезоэлектрический гидрофон

3) Фиксация измерения поглощения и рассеивания акустических волн в паровоздушной смеси. В начале возникновения кавитации, когда размеры пузырьков малы по сравнению с длиной звуковой волны, при очень низкой частоте звука происходит огибание звуковой волной этих пузырьков без отражения звука. По мере развития кавитации образуется завеса из парогазовых пузырьков и появляется своеобразная звукопоглощающая преграда. Этот способ требует достаточно сложной измерительной аппаратуры и повышенной точности проведения эксперимента.

Следует отметить, что пока не получены данные о хорошей корреляции уменьшения акустических излучений по мере развития кавитации.

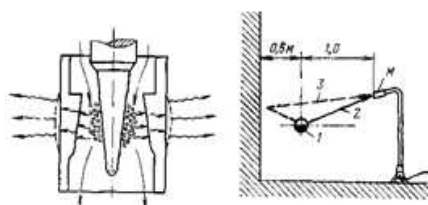
4) Ультразвуковые методы исследования кавитации получили наибольшее распространение и используются в основном при кавитационных испытаниях гидромашин. Этот метод дает хорошие результаты, но отличается сложностью: используется дорогая и многоэлементная аппаратура.

5) Метод измерения воздушного шума, возбуждаемого стенками исследуемого объекта, является наиболее простым и приемлемым для исследования кавитации как в лабораториях, так и производственных условиях. Преимущества этого метода заключаются в том, что измерения воздушного шума при кавитации можно производить переносными шумомерами и анализаторами частот.

При выборе метода акустических исследований кавитации ставится задача определения характерных признаков кавитационного шума, которые изменяются одновременно с развитием кавитации. Очевидно, что при этом нет необходимости в определении абсолютных величин кавитационного шума, а достаточно знания относительных величин, измеряемых по мере развития кавитации.

На рисунке 3.3 показана схема передачи акустических колебаний, генерируемых кавитационной областью при течении жидкости через дроссельное устройство односедельного регулирующего клапана [17]. Звуковые колебания, излучаемые кавитационной областью, воспринимаются стенкой корпуса и вызывают колебания ее. При этом происходит изменение акустических излучений (их интенсивности и частоты).

Характеристики кавитационного шума изменяются в зависимости от частотных характеристик материала корпуса, толщины стенок, жесткости конструкции клапана и жесткости трубопровода. В результате имеет место своеобразное осреднение характеристик кавитационного шума. Следовательно, корпус клапана выполняет роль стабилизатора, который срезает дискретные составляющие спектра и резонансные пики интенсивности кавитационного шума.



- 1 — регулирующий клапан; 2 — прямой звуковой сигнал;  
3 — отраженный звуковой сигнал; М — микрофон.

Рисунок 3.3 - Схема передачи акустических колебаний, генерируемых кавитационной областью

При измерении уровня воздушного шума, вызванного кавитацией, микрофон располагается в прямом поле излучения в помещении, не имеющем звукопоглощающего покрытия стен. Поэтому микрофон воспринимает кроме основного звукового сигнала еще и отраженные (рисунок 3.3), которые ослабляются некоторым звукопоглощением стен и за счет разности расстояния между микрофоном и объектом исследования, с одной стороны, и между микрофоном и поверхностью стены — с другой. Уровень звукового давления отраженного сигнала определяется по формуле:

$$L = L_1 - 20 \lg \cdot (r - r_1), \quad (3.1)$$

где  $L$  и  $L_1$  — уровни звукового давления на расстояниях соответственно  $r$  и  $r_1$ .

Вместе с тем из вышеизложенного ясно, что выделять значения прямых звуковых сигналов необязательно.

При измерениях воздушного шума, как правило, производится учет акустического фона.

Акустические методы исследования кавитации при помощи измерения воздушного шума могут быть проведены четырьмя путями:

- 1) анализом суммарного уровня кавитационного шума, измеряемого по шкале шумомера;
- 2) при измерение уровня шума на критической частоте колебаний;
- 3) анализом частотного спектра;
- 4) анализом амплитуд звуковых колебаний.

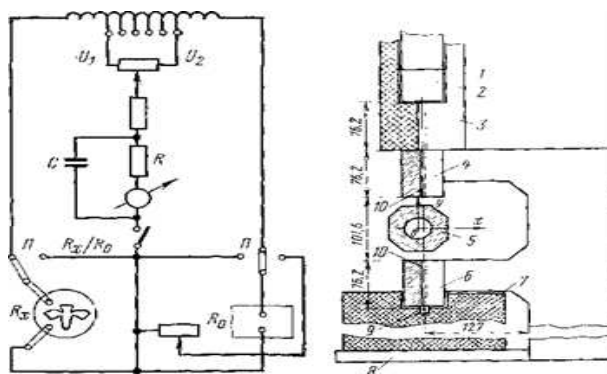
### **3.3 Электрические методы исследования кавитации**

В этих методах используются изменения электрических свойств жидкостей (омическое сопротивление, емкость и др.) вследствие изменения структуры потока при различных стадиях развития кавитации.

Рассмотрим омический способ исследования кавитации, разработанный в Харьковском политехническом институте Л. С. Шмугляковым и А. В. Федоровым. Этот метод основан на измерении омического сопротивления потока жидкости с помощью пары электродов, включенных в одно из плеч моста сопротивления. При этом может быть применена одинарная или дифференциальная мостовая схема.

Как показали опыты авторов, одинарная схема измерения омического сопротивления имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что начальное значение сопротивления потока жидкости при отсутствии кавитации оказывается нестабильным вследствие влияния на его величину температуры воды, ее состава и примесей в ней. Эти недостатки исключаются при использовании дифференциальной схемы замера, при которой используется вторая пара электродов, помещаемая в специальном корпусе на отводе (байпасе) от основного потока, в котором при всех режимах течения жидкости кавитация отсутствует. Эта пара является вторым плечом мостовой схемы, в которой измеряется не само омическое сопротивление  $R_x$  потока при кавитации, а отношение его к сопротивлению  $R_0$  воды между электродами в корпусе байпаса при отсутствии кавитации.

Омический индикатор кавитации с использованием дифференциальной схемы замера показан на рисунке 3.4.



1 — фотоэлемент; 2 — кристалл  $\text{NaI(Tl)}$ ; 3 — свинцовый экран; 4 — коллиматор (латунь); 5 — поперечное сечение сопла; 6 — коллиматор (латунь); 7 — свинцовый экран; 8 — подвижный стол; 9 — источник  $\text{Co}^{60}$ ; 10 — щели 0,762x5,08 мм

Рисунок 3.4 - Схема денситометра

Здесь в качестве основы применен дифференциальный трансформатор. Двумя плечами моста являются сопротивления потока  $R_x$  и  $R_0$ . Двумя другими плечами является обмотка трансформатора  $Tr$ , разделенная выводами на две части. Установка переключателя  $Я$  в различные положения позволяет регулировать величину сопротивления этих плеч, что используется для уравнивания измерительной схемы в начале опытов. Показателем степени развития кавитации здесь является отклонение стрелки микроамперметра (включенного в диагональ моста), пропорциональное отношению. Для стабилизации показания гальванометра в схеме применена интегрирующая цепочка, позволяющая надежно снимать показания, несмотря на неустановившийся характер самого явления кавитации.

Приведенная схема позволяет измерять не только  $R_x/R_0$ , но и величины  $R_x$  и  $R_0$  — каждую в отдельности, что также используется для настройки всей схемы перед началом испытания. Хотя описанный метод был разработан для исследования кавитации в гидротурбинах и гидромашинах, он также может быть с успехом использован при кавитационных исследованиях различных типов местных сопротивлений как в лабораторных, так и производственных условиях.

### 3.4 Радиоактивные методы исследования кавитации

Эти методы основаны на том факте, что поглощательная способность жидкости по отношению к частицам радиоактивного излучения сильно зависит от ее плотности.

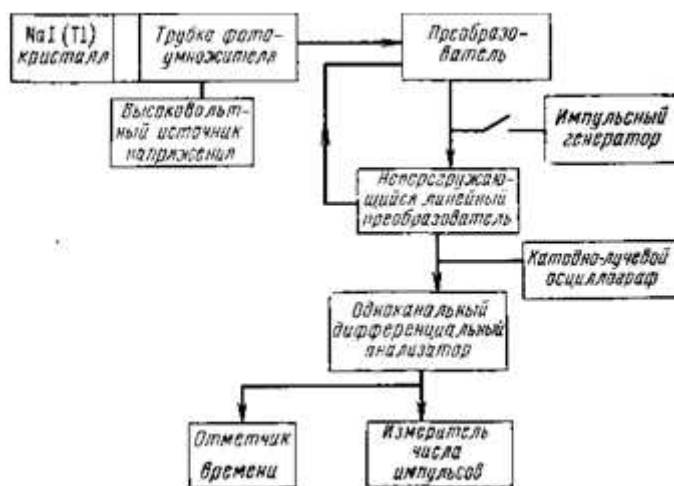
Радиоактивные методы могут быть использованы при изучении кавитации в очень широком диапазоне плотностей кавитирующих жидкостей, при этом в зависимости от рода жидкости выбирается



соответствующая интенсивность и энергетический уровень излучения радиоактивного источника.

Ниже приводится принцип работы и краткое описание конструкции гамма-лучевого денситомера (измерителя плотности), разработанного в Мичиганском университете для исследования кавитации ртути в трубе Вентури.

На рисунке 3.4 показана схема гамма лучевого коллиматора и детектора, который соответственно фиксирует пучок гамма-лучей и измеряет его ослабление в процессе прохождения через объект с исследуемой жидкостью. Коллиматор 4, выполненный из латуни, имеет прямоугольные щели 10 размером 0,7·5,1 мм, точно расположенные по одной вертикальной оси. Щель параллельна направлению потока жидкости в исследуемом объекте. Изменение характеристик потока вдоль оси в пределах длины щели не очень велико по сравнению с радиальным направлением и щель шириной 0,7 мм достаточно мала, чтобы обнаружить эти изменения, так же как и обеспечить прохождение пучка гамма-лучей, достаточного для получения статистической точности около 1 % при использовании источника излучения  $^{60}\text{Co}$  интенсивностью в 20 мКи. Кобальт-60 ( $^{60}\text{Co}$ ) был выбран вследствие его относительно высокой энергии гамма-излучения, способной проходить через поток ртути, не сильно поглощаясь. Интенсивность излучения в 20 мКи выбрана из условия обеспечения хорошей статистической точности при ширине щели, достаточно малой, чтобы точно определить место, в котором проводятся измерения; с другой стороны, эта интенсивность приемлема с точки зрения безопасности. Чтобы исключить погрешности, вызванные отраженным рассеиванием, счетчик регистрировал только излучение  $^{60}\text{Co}$ .



Рисунке 3.5 - Блок-схема электронного оборудования для исследования кавитации радиоактивным методом

Источник излучения 9 изготовлен из отрезка кобальтовой (100% Co59) проволоки диаметром 1 мм и длиной 6,4 мм, заключенного в алюминиевый цилиндр диаметром 8 мм и длиной 50,8 мм. Этот патрон облучается в ядерном реакторе до достижения требуемого уровня радиоактивности. Алюминиевый кожух служит также для установки источника излучения в коллиматоре.

Вся система монтируется на индикаторном столе с делительной головкой таким образом, что горизонтальное перемещение вертикального пучка гамма-лучей в радиальном и осевом направлении возможно с точностью до 0,25 мм. Для защиты персонала детектор и источник экранируются мощными свинцовыми плитами. Электронная аппаратура, используемая в данном случае, включает в себя активированный таллием натриевойодный, сцинтиллирующий кристаллический детектор, трубу фотоэлектронного умножителя, высоковольтный источник напряжения, предварительный усилитель, линейный усилитель без перегрузок, одноканальный дифференциальный анализатор, измеритель частоты одиночных импульсов, пересчетное устройство и катодно-лучевой осциллограф. Блок-схема различных узлов электронного оборудования приведена на рисунке 3.5.

### 3.5 Визуальные наблюдения, фотографирование и киносъемка

Для визуальных наблюдений, фотографирования и киносъемки кавитационных явлений в местных сопротивлениях последние выполняют в виде прозрачных моделей, изготавливаемых обычно из оргстекла. В некоторых случаях экспериментальная модель выполняется прозрачной только в некоторой части местного сопротивления, представляющего интерес для кавитационных исследований. Использование фото- и киносъемок как метода исследования объясняется возможностью фиксации процессов, длящихся доли секунды, при высокой наглядности и документальной достоверности результатов. Для наблюдения, фотографирования и киносъемки исследуемых участков местного сопротивления необходимо применение осветительных средств, обладающих достаточной световой отдачей для освещения модели через толщу потока.

В качестве осветительных средств в зависимости от целей эксперимента могут применяться как лампы накаливания, так и газоразрядные источники света - ртутные и газоразрядные лампы высокого и сверхвысокого давления и импульсные лампы многократного действия.

Фотографирование применяют преимущественно для регистрации процессов, не связанных со временем (например, при фиксации различных областей местного сопротивления, где имеет место кавитация), а также для определения длины и ширины кавитационной зоны при различных стадиях возникновения и развития кавитации.

Киносъемки производят в тех случаях, когда требуется фиксация течения процесса во времени (например, возникновение, рост и исчезновение кавитационных каверн и пузырьков). В зависимости от частоты съемки кинокамеры подразделяют на три категории: обычные, обеспечивающие съемку до 100 кадров в секунду; скоростные—с частотой съемки до 10 000 кадров в секунду и высокоскоростные, дающие сотни тысяч

и миллионы кадров в секунду.

Подробное описание источников света и принципы их работы приведены в [31], а также могут быть найдены в специальных руководствах.

### **3.6 Методы и приборы для измерения растягивающих напряжений в жидкости**

Так как величина растягивающих напряжений в жидкости непосредственно определяет давление, при котором возникает кавитация  $p_{\text{кав.}}$ , то методике измерения этих усилий уделяется серьезное внимание.

Экспериментальные исследования растягивающих напряжений могут быть проведены как в покоящейся, так и в движущейся жидкости. В настоящее время известно большое количество методов определения растягивающих напряжений (объемной прочности) жидкостей как при статическом, так и динамическом воздействии внешней силы [22, 25]. Рассмотрим некоторые методы.

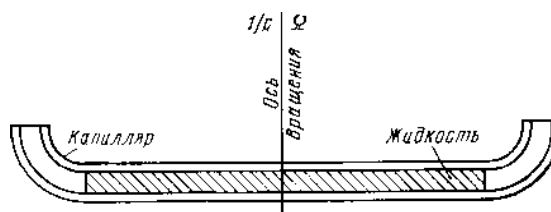


Рисунок 3.6 - Схема простейшего устройства для определения растягивающих напряжений в жидкости

Один из простых и нашедших широкое распространение методов определения растягивающих напряжений принадлежит Рейнольдсу, который сводится к следующему. Короткую трубку (чаще капилляр) с загнутыми и открытыми концами (рисунок 3.6) заполняют исследуемой жидкостью и устанавливают на специальное приспособление, на котором она приводится во вращение в горизонтальной плоскости. В результате плавного увеличения

скорости вращения жидкость разрывается под действием возрастающих центробежных сил. Разрыв происходит на оси вращения и регистрируется при помощи специального датчика. Прочность жидкости - отрицательное давление, определяется по формуле:

$$-p = Z = p_0 - \frac{1}{2} \rho \Omega^2 r^2, \quad (3.2)$$

Где  $\Omega$  – угловая скорость вращения в момент разрыва;

$r$  – расстояние от оси вращения до центра тяжести половины столба жидкости.

Как указывается в [22], полученные указанным способом величины прочности жидкостей имеют большой разброс экспериментальных значений, в большей мере связанный с трудностью обеспечения чистоты поверхности, с которой соприкасается исследуемый образец жидкости.

В 1950 г. Бриггсу [13] благодаря особенно тщательно поставленным исследованиям удалось получить приемлемый разброс экспериментальных значений, что объясняется способом заполнения трубки. Трубка опускалась в кипящую жидкость, где заполнялась полностью жидкостью без каких-либо остаточных пузырьков. Результаты опытов Бриггса в виде графика зависимости прочности воды от температуры приведены на рисунке 3.7.

Рисом и Тревеной предложен отличный от описанного выше метод определения растягивающих напряжений в жидкостях, заключающийся в следующем. Цилиндрическая стальная трубка заполняется исследуемой жидкостью и плотно закрывается с обеих сторон. Затем эта трубка нагревается до определенной начальной температуры  $t_{нач}$ . При нагревании жидкость расширяется быстрее, чем трубка, в результате чего происходит полное заполнение трубки жидкостью и сцепление ее с внутренней поверхностью трубки. При медленном охлаждении трубки находящаяся в ней жидкость подвергается увеличивающему растягивающему напряжению

до того момента, пока не произойдет разрыв сплошности жидкости.

При температуре разрыва жидкости происходит внезапное понижение растягивающего напряжения, сопровождающееся внезапным изменением внешнего объема трубки на величину  $\Delta F$ . Начало кавитации, т. е. максимальное растягивающее напряжение  $Z$ , которое выдерживает жидкость до появления кавитации, подсчитывается по результатам измерения  $\Delta U$  и модулю упругости материала трубки.

Авторами этого метода была выполнена серия экспериментов для определения влияния температуры на возникновение кавитации. Ниже приведены осредненные данные по возникновению кавитации в воде при различных начальных температурах.

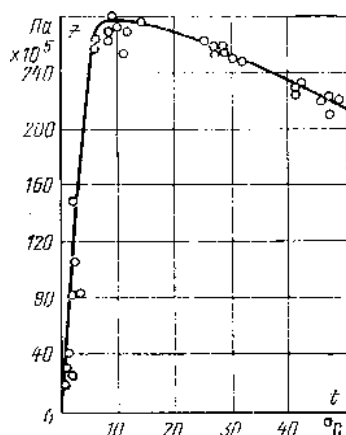


Рисунок 3.7 - Зависимость растягивающих напряжений (объемной прочности) воды от температуры по опытным данным Бригса.

Таким образом, с увеличением температуры воды увеличиваются также значения растягивающих -напряжений. Эти данные расходятся с результатами, полученными Бриггсом (см. рисунок 3.7).

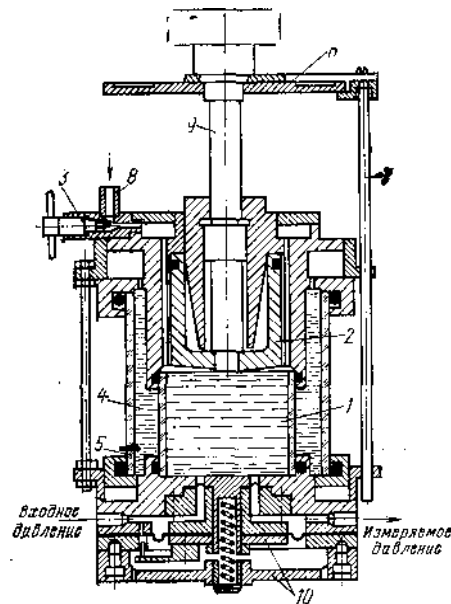


Рисунок 3.8 - Схема прибора для определения критического давления кавитации в жидкости, содержащей растворенные газы

Полученные противоречивые результаты объясняются, во-первых, трудностью учета влияния газовых и паровых пузырьков (зародышей) при определении растягивающих напряжений в жидкостях; во-вторых, неясностью места появления разрыва сплошности - в самой жидкости или у стенок трубки; иными словами, обусловлен ли этот разрыв потерями сцепления между слоями жидкости или потерями на трение у стенок.

Рис и Тревена склонны к тому, что разрыв сплошности происходит в результате уменьшения трения у стенок трубки. Этот вопрос изучен пока недостаточно полно.

Миннели [26] предложен выбор (рисунок 3.8) непосредственного определения критического давления  $P_{\text{кав}}$ , при котором возникает кавитация в жидкости, содержащей растворенные газы.

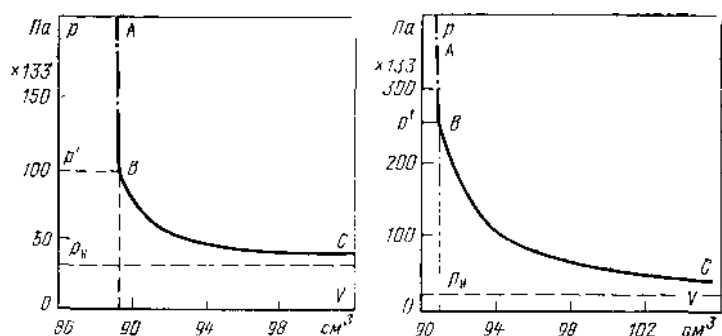


Рисунок 3.9 - Опытные зависимости давления от общего объема расширяющегося образца жидкости при различных температурах

Принцип действия этого прибора основан на расширении исследуемой пробы (образца) жидкости. Перемещают поршень 2 в верхнее положение и подают через трубку 8 и запорный вентиль исследуемую жидкость в цилиндр 1. Затем поршень опускают до того положения, пока из вентиля 3 не выйдут все пузырьки газа. Через прозрачные стенки цилиндра 1 и рубашки 4 наблюдают за тем, чтобы на стенках цилиндра не остались прилипшие пузырьки газа. Затем вентиль 3 закрывают, отсекая исследуемый образец жидкости. Объем жидкости определяет положение штока 7 и гониометра 6. С помощью специального насоса, подсоединяемого к прибору, создают циркуляцию жидкости через рубашку цилиндра 4 для уравнивания температуры во всем объеме отсеченной пробы жидкости. Температуру циркулирующей жидкости измеряют миниатюрной термопарой 5. При проведении опыта поршень 2 осторожно (плавно) поднимают с помощью микрометрического винта 9, определяя по гониометру (угломеру) 6 результирующее увеличение объема. При каждом положении поршня фиксируют давление мембранным манометром с компенсацией сил 10, который, работая с практически неподвижной точкой, не вносит существенных изменений в объеме замкнутого образца. Обычные манометры с трубкой Бурдона или столбом жидкости в данном случае не могут быть использованы из-за трудностей, которые возникают при поддержании на заданном уровне температуры жидкости внутри самих манометров, а как же из-за помех, вносимых изменениями объёма при изменении давления. Кроме



того, внутри этих манометров могут возникать незаметные пустоты, искажающие результаты измерений. При каждом положении поршня ожидают стабилизации давления для приближения к равновесному состоянию, а затем измеряют давление. По результатам опытов строят график зависимости давления в мм рт. ст. (измеренного манометром за вычетом гидростатического напора жидкости в цилиндре) от общего объема расширяющегося образца жидкости (см. рисунок 3.9). На графиках ясно выделяется расширение с пузырьками газа (линия  $BC$ ). На графике пунктирной линией показано давление насыщенных паров исследуемой жидкостью  $p_a$ . Как видно,  $p_H$  значительно меньше давления начала возникновения кавитации  $p_{шв}$ .

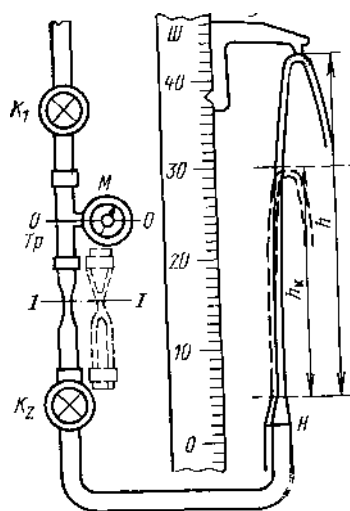


Рисунок 3.10 - Экспериментальная установка Эпштейна для определения растягивающих напряжений в движущиеся жидкости

Выше были рассмотрены некоторые методы и приборы для определения растягивающих напряжений (прочности) жидкостей, находящихся в статическом состоянии. В связи с тем, что кавитация в местных сопротивлениях возникает при движении жидкости, данные по прочности жидкостей, находящихся в статическом состоянии, не всегда с достаточной точностью могут быть использованы для изучения условий

возникновения кавитации. Поэтому часто прибегают к определению прочности жидкости при ее движении.

Одним из первых исследователей, поставивший эксперимент по определению растягивающих напряжений в движущейся жидкости, был Л. А. Эпштейн, который создал небольшую установку, схематически изображенную на рисунке 3.10. При открытии крана  $K_1$  водопроводная вода поступала в измерительную трубку с пережатием и далее через дросселирующий кран  $K_2$  — в сливную трубку, оканчивающуюся калиброванным вертикальным наконечником  $A$ . Высота фонтанчика  $h$ , поднимавшегося из наконечника, измерялась при помощи подвижного указателя и шкалы.

Сущность опыта заключалась в том, чтобы внезапным открытием крана создать условия, при которых хотя бы в течение непродолжительного времени до возникновения разрывов в жидкости существовали растягивающие напряжения. Кроме того, установка позволяла оценить эти растягивающие напряжения по каким-либо косвенным показателям, без непосредственных измерений давления в узком сечении 1-1. В данном случае таким косвенным показателем служила высота фонтанчика  $h$ . Если регулировкой открытия кранов  $K_1$  и  $K_2$  постоянно увеличивать скорость воды в сечении 1-1, то при некотором ее значении появится характерное потрескивание и ниже самого узкого места станут видимы кавитационные пузырьки. При дальнейшем увеличении скорости интенсивность кавитации и сопутствующий ей звук усиливаются.

Добившись развития кавитации определенной интенсивности, можно перекрыть кран  $K_2$  и затем вновь быстро открыть его. При этом на некоторое время установится бескавитационный режим, который самопроизвольно перейдет в режим кавитации, существовавший ранее. При таком переходе от бескавитационного режима к кавитационному высота фонтанчика, выбрасываемого из насадка, резко уменьшится, а давление воды в сечении 0 несколько возрастет.

Интересующее нас давление в сечении 1-1 рассчитывается по измеренным величинам  $p_0$  и  $h$  с использованием уравнений Бернулли и неразрывности. На рисунке 3.11 приведены результаты опытов, выполненных Л. А. Эпштейном в виде зависимостей  $h(p_0)$  и  $hK(p_0)$ , полученных для трубки диаметром в узком сечении  $d_{min}=2$  мм. По полученным из опытов высотам фонтанчиков при бескавитационном и кавитационном режимах течения  $h$  и  $hK$  (рисунк5.11) рассчитываются растягивающие напряжения, действующие в жидкости и соответствующие скорости течения. В этих опытах при скоростях течения в узком сечении больше 30 м /с были получены растягивающие напряжения в водопроводной воде до 4-105 Па. Более подробно с результатами исследований можно ознакомиться в литературе [22].

Циглерв своих опытах по непосредственному определению растягивающих напряжений в движущейся жидкости использовал прозрачную трубу Вентури круглого сечения с диаметром на входе  $d=50$  мм, а в узком сечении  $d_{min}=20$  мм. Опыты производились при скоростях течения жидкости в узком сечении от 6 до 30 м/с. Зарождение кавитации определялось оптическими и акустическими методами с помощью высокочувствительного электрического виброметра. Применялось мгновенное фотографирование; особое внимание уделялось точности измерений давления в рабочей камере, которая была дренирована и к отверстиям подключался батарейный манометр.

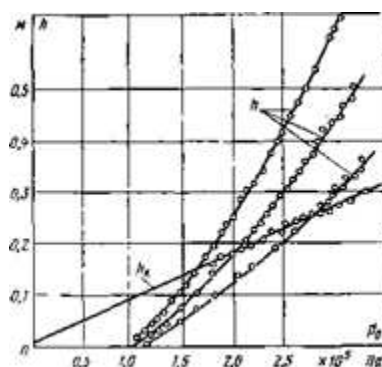


Рисунок 3.11 - Результаты непосредственных измерений Эпштейна

Для исключения влияния пьезоотверстий на результаты опытов, а также чтобы края пьезоотверстий в горловине трубы Вентури не могли послужить причиной возбуждения нежелательной кавитации, пьезоотверстия были сделаны только в одном основном объекте исследований. При этом для определения давлений в сжатом сечении других объектов исследований пользовались данными тарировки давления с помощью других труб Вентури, но тех же размеров. Результаты непосредственных измерений давлений в различных точках трубы Вентури по данным Циглера показаны на рисунке 3.11. Кривые 1 и 2 представляют собой распределения давлений при бескавитационном режиме течения, когда во всех, точках измерительного участка еще существует положительное давление. Кривые соответствуют различным уровням статического давления, а их ординаты на всем своем протяжении различаются на постоянную величину, очевидно, равную  $p_{oi} - P_{02}$ . Кривая 3 соответствует началу кавитации.

Здесь в районе шестого, седьмого и восьмого пьезометрических отверстий возникают растягивающие напряжения, вследствие чего определенные трубки пьезометра выходят из строя и дают неверные показания. При характеристиках течения, соответствующих кривой 3, кавитационные пузырьки либо еще существуют, либо в сравнении с масштабом течения имеют ничтожно малый размер. В обоих случаях кривая распределения давления должна иметь такой вид, как если бы кавитация не возникла. Таким образом, в области действия растягивающих напряжений давление может быть определено по кривой, отвечающей докавитационному режиму. Методы экспериментального определения величины растягивающих напряжений при движении жидкостей, отличных от воды, мало чем отличаются от описанных выше. Однако количественные значения давления при возникновении кавитации могут различаться.

Ниже приводятся результаты исследований Ш. И. Рахматуллина и Л. Г. Колпакова по определению давления, при котором возникает кавитация при

движении нефтей в трубе Вентури [23]. Схема замера давлений в трубе Вентури показана на рисунке 3.12.

По результатам экспериментов построены зависимости давления в горловине трубы  $p_r$  и перепада давлений  $\Delta p = p_{\text{вых}} - p_r$  в диффузорной части от расхода нефти при бескавитационных и кавитационных режимах. Анализ опытных данных, представленных на рисунке 14, показывает, что при кавитационном режиме давление в горловине трубы соответствует постоянному значению при данной температуре опыта и не зависит от степени развития кавитации. Давление в камере соответствует горизонтальному участку на графике зависимостей.

Этими исследователями проведено уравнение полученных результатов по давлениям начала кавитации при движении жидкости с данными, полученными для начала испарения рассматриваемых сортов нефти в статических условиях, на приборах, применяемых для этих целей. При статических испытаниях устанавливалась зависимость давления насыщенных паров (упругости паров) нефти от соотношения фаз при температуре опыта. Из полученной серии кривых, соответствующих различным температурам, определялась истинная упругость паров, т. е. давление насыщенных паров, соответствующее соотношению фаз, близкому к нулю.

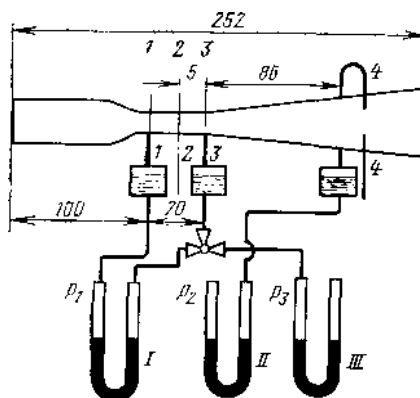


Рисунок 3.12 - Схема замеров давлений в трубе Вентури для определения растягивающих напряжений при движении нефтей.

Кроме определения прочности жидкости, находящейся в состоянии покоя или движения, для практики также представляют значительный интерес данные по прочности жидкости при динамическом приложении внешних сил, которые могут иметь место в трубопроводах и местных сопротивлениях при внезапных увеличениях или уменьшениях скорости движения жидкости, в частности при явлениях гидравлического удара.

Методика определения растягивающих напряжений в жидкостях при динамическом воздействии сил, предложенная Дэвисом и др. [14], заключалась в следующем. Испытуемая жидкость помещалась в трубу диаметром 22 мм и длиной 565 мм. По обоим концам трубы располагались точно пригнанные поршни, одному из которых сообщался импульс от выстрела свинцовой пулей. Импульс от удара свинцовой пули передается через жидкость к верхнему поршню, колебания которого могут быть зарегистрированы с помощью конденсаторного датчика давления. Продолжительность и колебание давления во времени этого импульса могут быть подсчитаны при помощи следующих величин: массы поршня; зависимости между давлением, произведенным пулей и временем; плотности жидкости и скорости звука в жидкости. Когда импульс сжатия достигает верхнего поршня, он отражается. Зная массу поршня и зависимость между избыточным давлением и временем, можно подсчитать колебания скорости и ускорение этого поршня. Для непосредственного измерения динамической прочности жидкости этими авторами применялся сосуд — трубка со свободной поверхностью жидкости. Импульс создавался ударом пули, и давления измерялись с помощью дюралюминиевого стержня, который служил передаточным звеном для регистрации импульсов давления в жидкости с помощью конденсаторного и проволочного датчиков [30].

Экспериментальная установка для исследования кавитационных свойств жидкостей и анализ результатов описана в [6].

При рассмотрении кавитационных свойств жидкости по умолчанию принято, что разряжение в исследуемой жидкости проводится в условиях ее

прилипания к твердой поверхности (доньшку поршня гидроцилиндра и крышке кавитационной камеры), обусловленное их смачиваемостью.

Вакуум в кавитационной камере 3 (рисунок 3.13) создается вакуумным поршневым насосом 2 с пневмоприводом 1. Кавитационная камера насажена на поршневую полость насоса и представляет собой толстостенную стеклянную трубку с внутренним диаметром  $d_k = 12$  мм и длиной  $h = 580$  мм. При одновременном включении соленоидов  $S2$  и  $S3$  пневматического и гидравлического распределителей, начинается прямой ход поршня вакуумного насоса и заполнение кавитационной камеры исследуемой жидкостью. Ускоренное заполнение кавитационной камеры из питательного бака 13 происходит при полностью открытом дросселе 9. Вытеснение жидкости из кавитационной камеры в питательный бак происходит через обратный клапан 10 линии байпаса при обратном ходе поршня (выключение соленоидов  $S2$  и  $S3$  и включение соленоида  $S1$ ). В этом случае, насыщенная пузырьками нерастворенного воздуха и пара жидкость, из кавитационной камеры сливается в верхнюю часть питательного бака. Выделяющиеся из пузырьков воздух и пар отводятся в атмосферу через сапун 14 или кран 15 и, частично, возвращаются в жидкость через поверхность раздела.

Для удаления из жидкости нерастворенного и растворенного воздуха использовались нижеследующие технологии дегазации.

#### 1. Гидростатическая поверхностная дегазация (рисунок 3.13 б).

При закрытом кране 15, включенных соленоидах  $S2$  и  $S3$  и открытом дросселе 9 вакуумный насос 2 длительное время создавал над поверхностью жидкости в питательном баке 13 разрежение. При выключенном соленоиде  $S3$  и быстром обратном ходе поршня вакуумного насоса выделяющийся из жидкости воздух вытеснялся в атмосферу через обратный клапан 10.

#### 2. Гидродинамическая дегазация (рисунок 3.13 а).

При включенных соленоидах  $S2$  и  $S3$ , в процессе заполнения кавитационной камеры на дросселе 9 возникала кавитация с активной генерацией паровоздушных пузырьков. Вследствие того что на выходе дросселя и в

кавитационной камере существовал вакуум, находящиеся в жидкости пузырьки, не смыкаясь, всплывали, заполняли верхнюю часть объема камеры и частично увлекались потоком в поршневую полость гидроцилиндра вакуумного насоса. При быстром обратном ходе поршня и выключенном соленоиде S3, выделившиеся из жидкости воздух и пар вытеснялись в верхнюю часть питательного бака через обратный клапан 10. В соответствии с геометрией гидроцилиндра вакуумного насоса, полный объем его поршневой полости составлял 0,502 литра, а объем жидкости в питательном баке – 2,5 литра. Таким образом, за 10 циклов гидродинамической дегазации происходил двухкратный обмен жидкости в питательном баке, а за 25 циклов – пятикратный.

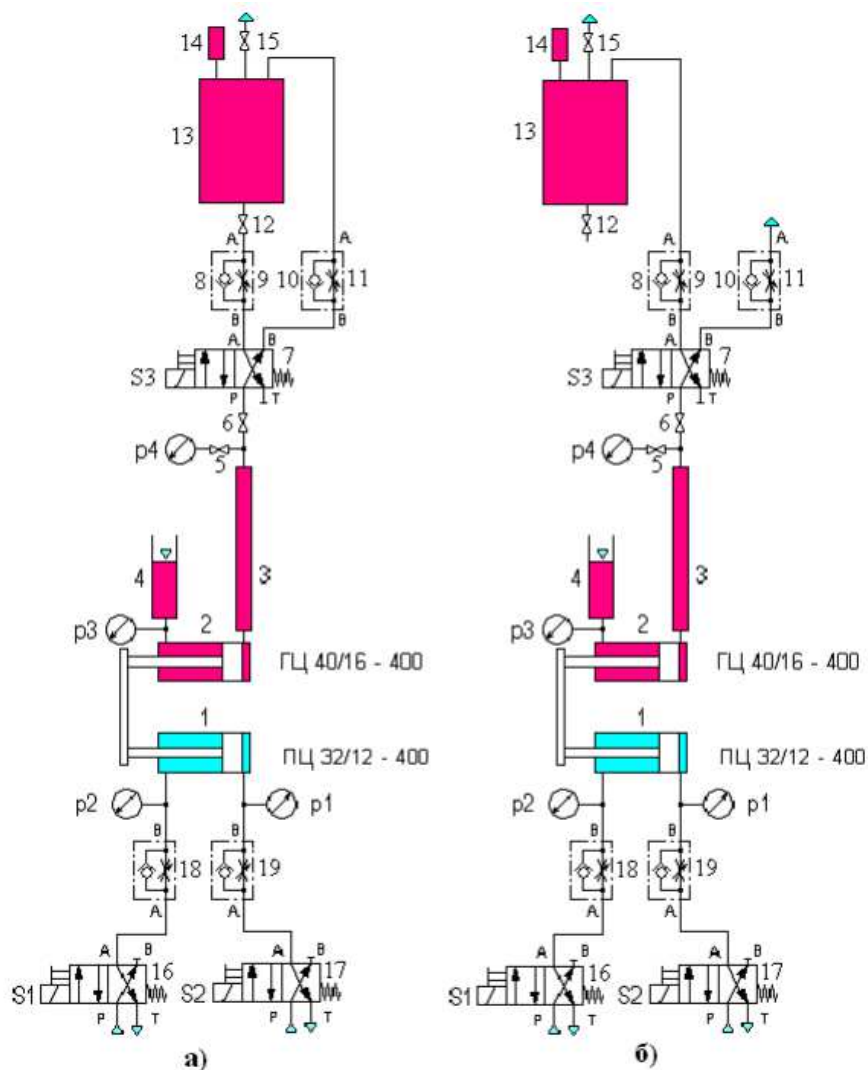


Рисунок 3.13 -Принципиальная схема экспериментальной установки



### 3. Разрывная дегазация (рисунок 3.13 а).

При закрытых вакуумных кранах 5 и 6, в конце хода поршня вакуумного насоса в кавитационной камере и в поршневой полости гидроцилиндра создавалось глубокое разрежение. После открытия крана 6 на дросселе 9 происходил активный кавитационный процесс с интенсивным выделением пузырьков растворенного и нерастворенного воздуха, которые при ускоренном обратном ходе поршня вакуумного насоса вытеснялись через обратный клапан 10 байпаса в верхнюю часть питательного бака.

В результате работы были сделаны следующие выводы:

1) Величина допустимого разряжения в реальной, специально не подготовленной жидкости, определяется количеством нерастворенного в ней воздуха.

2) Полный цикл гидродинамической дегазации жидкости методом вакуумирования кавитационной камеры, в среднем, на 30 % уменьшает величину максимально достижимого в жидкости абсолютного давления.

3) Величина допустимого разряжения в дегазированной жидкости определяется, в первую очередь, количеством растворенного в ней воздуха.

4) Величина допустимого абсолютного давления, при гидростатическом вакуумировании легко испаряющейся жидкости, в среднем, в полтора раза превышает давление ее насыщенных паров.

5) Величина допустимого абсолютного давления, при гидростатическом вакуумировании трудно испаряющейся при нормальных технических условиях жидкости, может от пяти до пятидесяти раз превышать давление ее насыщенных паров.

6) В вязкой жидкости ее гидродинамическая дегазация методом вакуумирования кавитационной камеры не реализуема. Из-за отсутствия естественной флотации мелких пузырьков; оставшееся в жидкости большое количество нерастворенного воздуха существенно повышает уровень минимально допустимого в ней абсолютного давления.

7) Уровень допустимого абсолютного давления в растворе больше того же показателя у растворителя. Предположительно, растворенное в жидкости вещество (твердое, жидкое или газообразное) ослабляет межмолекулярные связи растворителя и увеличивает давление его насыщенных паров.

8) Минимально допустимое значение абсолютного давления в глицерине в пятьдесят раз превышает давление его насыщенных паров, что обусловлено большим количеством остаточных пузырьков нерастворенного воздуха, не удаляемых в процессе гидродинамической дегазации.

9) Из исследованных технических жидкостей, наибольшей прочностью на разрыв обладает чистый глицерин ( $K_{\text{разр}} = 1,32$ ), наименьшей прочностью – керосин ( $K_{\text{разр}} = 0,86$ ).

10) Дистиллированная вода занимает промежуточное положение между ними ( $K_{\text{разр}} = 1$ ).

11) Твердое растворимое вещество (соль  $NaCl$ ) уменьшает прочность на разрыв растворителя (воды) на 10 %.

12) Жидкое растворимое вещество (глицерин) в водном растворе 49/51 % уменьшает прочность на разрыв растворителя на 13%.

Таким образом, представленный анализ экспериментальных исследований кавитационных процессов показал необходимость их дальнейшего развития с целью уточнения, обобщения и расширения диапазона исследований.

#### **4. Анализ экспериментального объекта, как объекта автоматизации**

Автоматизация – это применение комплекса средств, позволяющих осуществлять производственные процессы без непосредственного участия человека, но под его контролем.

Автоматизация производственных процессов приводит к увеличению выпуска, снижению себестоимости и улучшению качества продукции, повышает надежность и долговечность машин, позволяет экономить материалы, улучшает условия труда и повышает безопасность производства.

**В производственных процессах для выработки и реализации управляющих воздействий широко применяются АСУТП.**

На основе последних разработок теории автоматического регулирования и управления на базе вновь разработанных приборов и регуляторов создаются современные системы автоматизации.

#### 4.1 Экспериментальная установка

Экспериментальная установка представляет собой замкнутый гидродинамический контур (рис. 4.1). Движение жидкости осуществляется центробежным насосом, поток выравнивается, проходя через хойнекомб длиной 300 мм, представляющий собой набор трубок меньшего диаметра, поступает в ресорбер, где поток освобождается от свободного воздуха, рабочий участок и далее снова в насос.

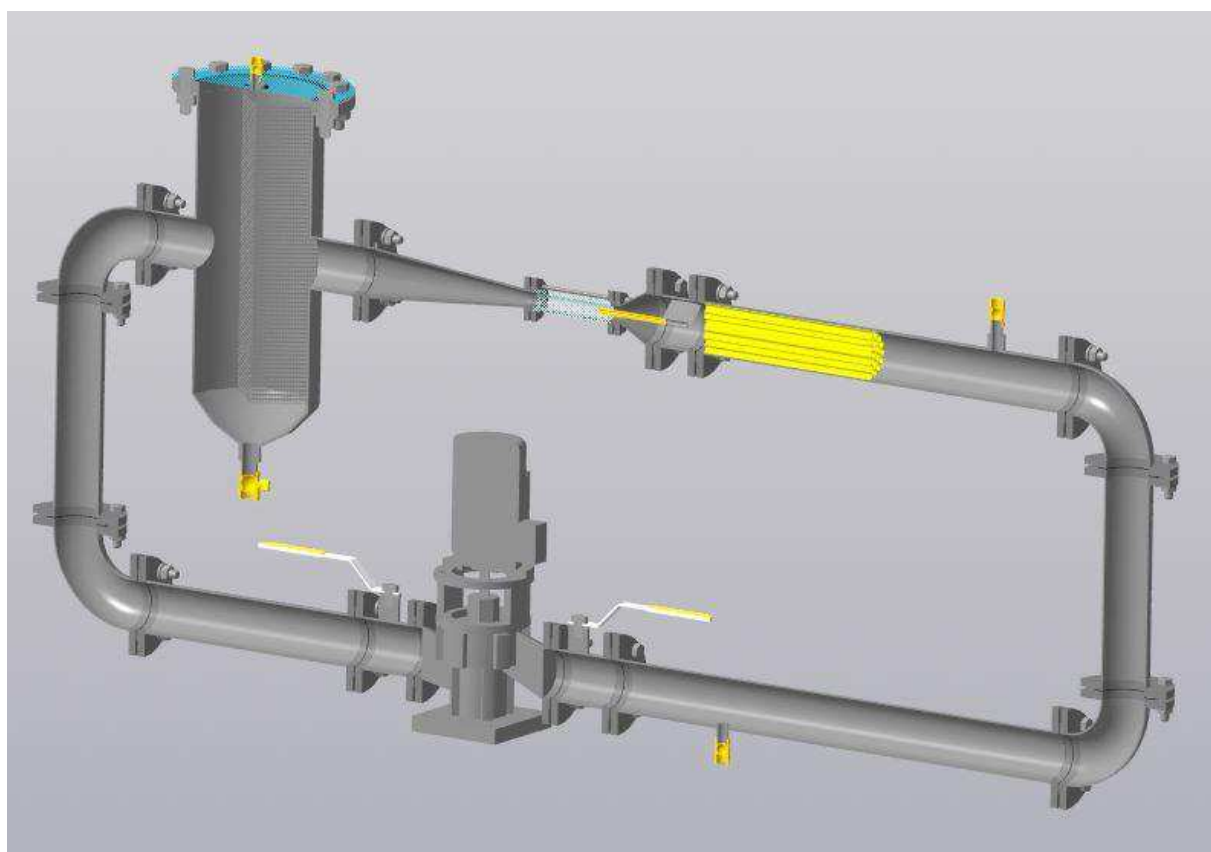
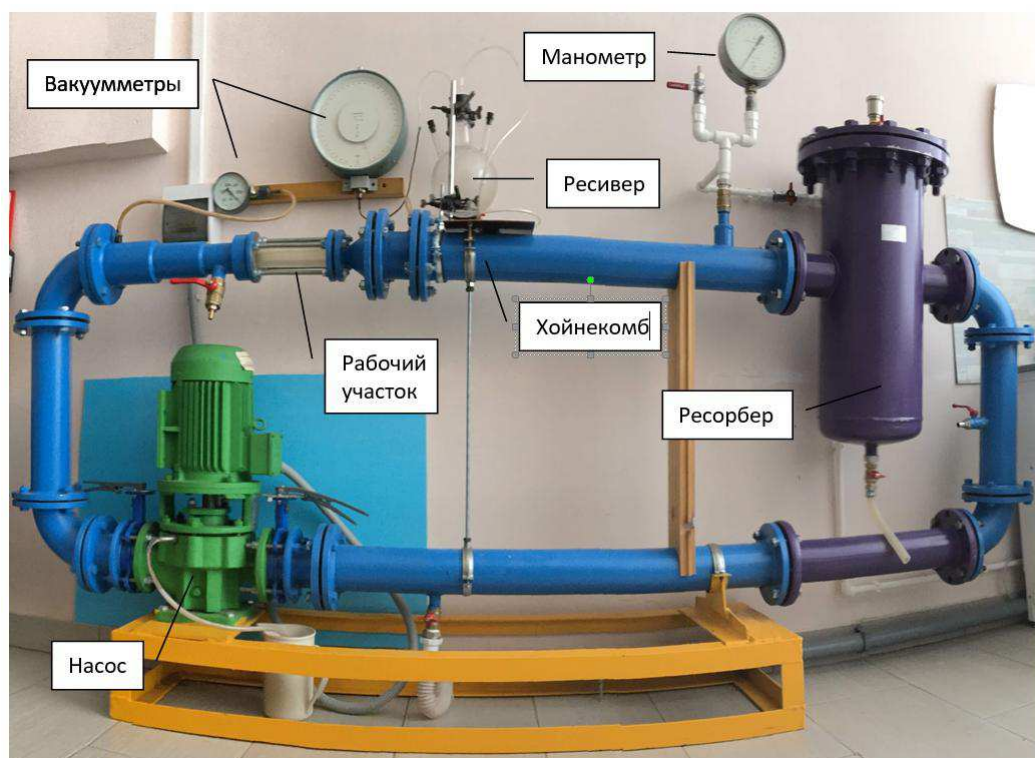


Рисунок 4.1 – Экспериментальная установка

Рабочий участок состоит из конфузора и прозрачной цилиндрической трубы ( $d_{\text{внутр.}} = 30$  мм,  $l = 200$  мм) с установленным в ней сопротивлением в виде усеченного конуса. В основании конуса имеется отверстие для измерения давления в камере.

Расчетный профиль скоростей и число Re по длине рабочего участка, рассчитанные для максимального расхода, приведен на рис. 4.2.

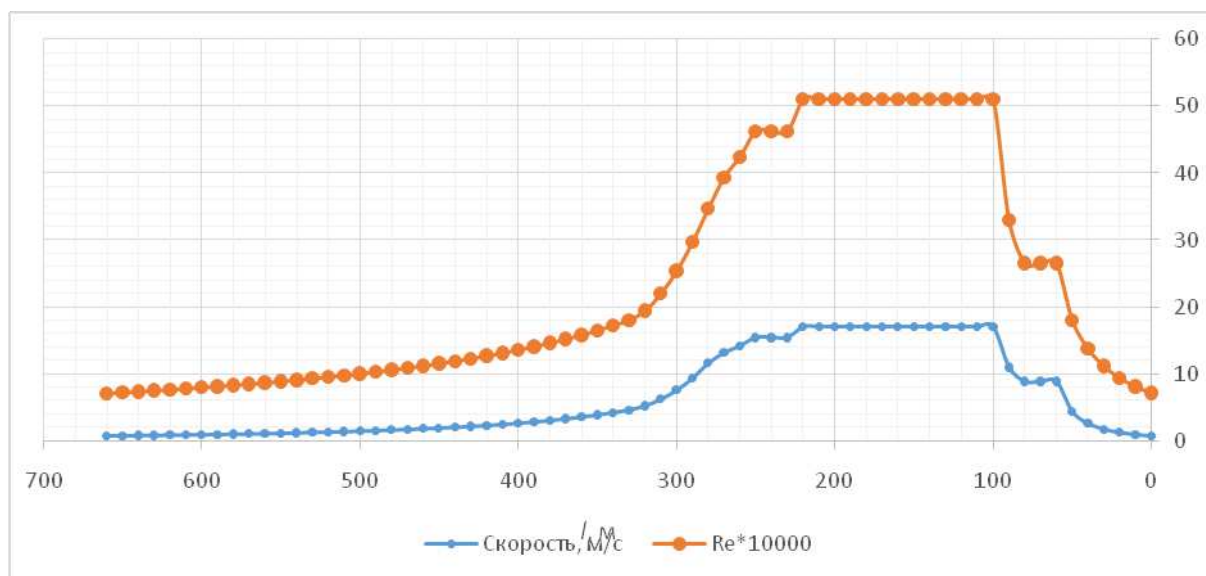


Рисунок 4.2 – Профиль скорости потока в рабочем участке и число Re

Рассматриваемый технологический объект - Экспериментальная гидродинамическая установка. Целевым продуктом является изучение режимов течения при обтекании жидкостью твердого тела с формированием в потоке зоны кавитации.

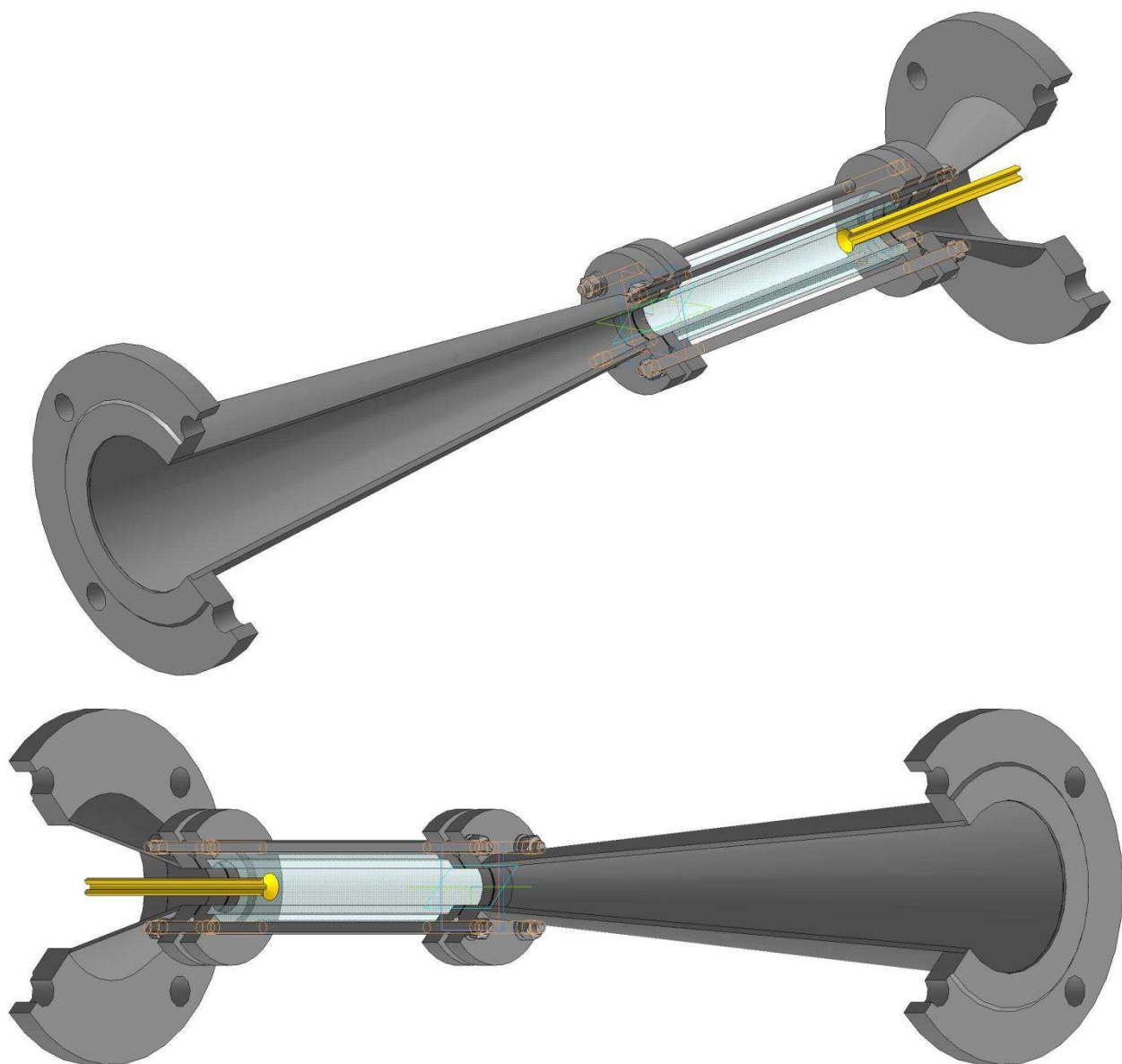


Рисунок 4.3 – Рабочий участок гидродинамической установки (Коверна)

Система заполняется жидкостью, в данном случае водопроводной водой. На перекачивающем насосе выбирается нужный расход воды. При помощи автоматического выключателя запускается электродвигатель насоса, который перекачивает жидкость в контуре.

Центробежный насос — один из двух типов динамических лопастных насосов, перемещение рабочего тела в котором происходит непрерывным потоком за счёт взаимодействия этого потока с подвижными вращающимися лопастями ротора и неподвижными лопастями корпуса. При

этом переносное движение рабочего тела происходит за счёт центробежной силы и протекает в радиальном направлении, то есть перпендикулярно оси вращения ротора.

Такие насосы одинаково применимы как для жидкостей, так и для газов, при этом насосы для перекачивания газов обычно называют центробежными компрессорами или центробежными вентиляторами.

Жидкость, пройдя по трубопроводам и поворотным коленам контура, попадает в хонейкомб (рисунок 4.4).



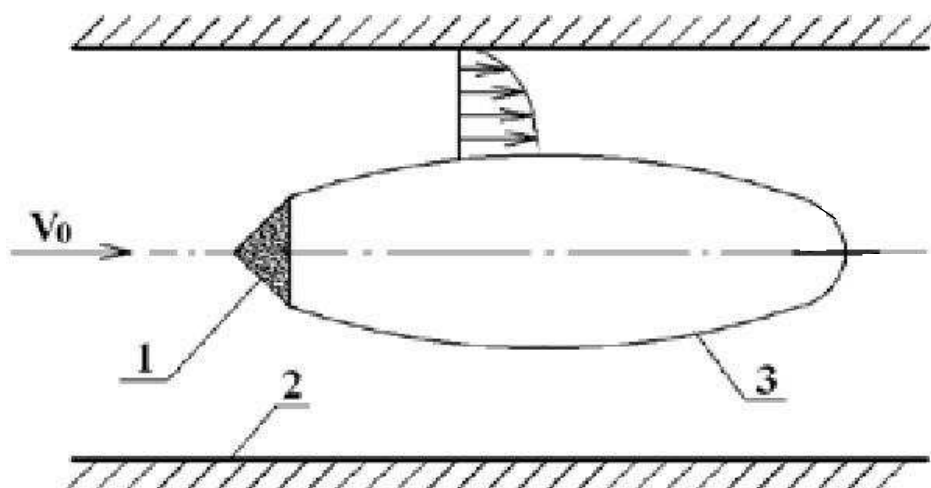
Рисунок 4.4 - Структура устройства хонейкомба

Хонейкомб представляет из себя множество труб меньше диаметра в одном трубопроводе, подобно пчелиным сотам. Хонейкомб служит для исключения завихрений жидкости, тем самым создавая ламинарный режим течения, который нужен для чистоты эксперимента.

Далее рабочая жидкость попадает в конфузор. Конфузор – это участок проточного канала в виде суживающейся трубы обычно круглого или прямоугольного сечения. В случае, когда в конфузор поступает поток жидкости или газа со скоростью, меньшей местной скорости звука, давление при переходе от широкого входного к узкому выходному сечению падает, а скорость и, следовательно, кинетическая энергия потока возрастают. При

дозвуковых скоростях течения эта конструкция работает как сопло. Если скорость течения на входе в конфузор превышает местную скорость звука, в конфузоре происходит торможение потока, которое может приводить к образованию ударных волн.

После конфузора жидкость попадает в рабочий участок, в котором находится кавитатор с определенным углом раскрытия (рисунок 4.5) - труба из органического стекла для возможного наблюдения за экспериментом.



1 – кавитатор; 2 – труба круглого сечения; 3 – суперкаверна  
Рисунок 4.5 - Принципиальная схема суперкавитационного испарения

Пройдя через рабочий участок, вода снова через всасывающий трубопровод попадает в перекачивающий насос, замыкающий гидродинамический контур.

В изначально представленном варианте для снятия показаний присутствовали такие приборы как вакуумметр, для фиксирования явления кавитации в кавитаторе и манометр для отслеживания давления в рабочем контуре.

Дренажная труба предназначена для опустошения замкнутого контура после окончания проведения эксперимента.



## 4.2 Определение основных рабочих параметров

Таблица 1. Основные рабочие параметры.

Позиция по функциональной схеме	Наименование параметра	Контроль		Регулирование
		показания	регистрация	
1	2	3	4	5
1-1	Давление	+	+	-
2-1	Давление разряжение	+	+	-
3-1	Температура жидкости	+	+	-
4-1	Скорость потока жидкости	+	+	-
5-1	Обороты в минуту эл.двигателя	+	+	+

В результате внедрения современной распределенной системы управления (на базе контроллера ОВЕН ПЛК154) будет достигнуто:

- облегчение снятия данных с измерительных приборов;
- увеличение точности показаний измерительных приборов;
- повышение безопасности при работе с установкой;
- оперативное обнаружение нарушений в ходе технологического процесса и своевременное вмешательство.

Функциональная схема технологического процесса приведена на схеме автоматизации (АПП.00001).

### 4.3 Функциональные задачи

Автоматизированная система управления технологическим процессом предназначена для управления гидродинамической установкой с целью повышения точности и снятия показаний в режиме реального времени.

Функциональные задачи:

- повысить точность показаний СИ;
- обеспечить обслуживающий персонал достоверной информацией о ходе технологического процесса и архивировать её
- улучшить условия работы с установкой.

#### 4.3.1 Обоснование выбора технических средств АСУТП

При выборе технических средств для АСУТП, необходимо учесть следующие основные требования:

- 1) технологические;
- 2) системные;
- 3) экономические;
- 4) монтажно-эксплуатационные.

#### 4.3.2 Технологические требования

Технологические требования зависят от характеристик объекта автоматизации, и определяются:

- а) по виду измеряемого параметра:
  - расход питательной воды (поз. 4-1)
  - температура (поз. 3-1)
  - давление (поз. 1-1; 2-1)
  - давление разрежения (б-1)

б) по характеру измеряемой среды:

– вода – агрессивная жидкость.

в) по характеру окружающей среды:

– датчики выбраны с учетом климатического исполнения.

#### 4.4 Системные требования

При выборе технических средств автоматизации были учтены следующие системные требования:

1) серийность выпуска технических средств – в основном продукция промышленной группы (ПГ) «ОВЕН»;

2) степень функционального развития – многофункциональность, модификация и комплектность поставки;

3) вид потребляемой энергии – электрические;

4) унификация входных и выходных сигналов – преобразователи с унифицированным выходным токовым сигналом 4-20 мА;

5) метрологические характеристики – приборы с классом точности до 0,5 и допускаемой основной погрешности  $\pm 0,25$ ;

6) надежность;

7) взаимозаменяемость составных частей.

##### 4.4.1 Экономические требования

Экономические требования определяются стоимостной категорией и оптимальными соотношениями “цена/качество”, “цена/параметры”, “цена/производительность”, затраты на монтаж, сервисное обслуживание и другие.

##### 4.4.2 Монтажно-эксплуатационные требования

При выборе технических средств автоматизации были учтены следующие монтажно-эксплуатационные требования:

а) особенности установки на объекте, технологическом трубопроводе, в непосредственной близости от технологического оборудования;

б) габаритные размеры монтажной части;

в) удобство монтажа, эксплуатации и ремонта.

#### 4.4.3 Выбор технических средств АСУ ТП

Учитывая вышеперечисленные требования, были выбраны следующие технические средства:

– для измерения расхода питательной воды выбираем расходомер ВСХНд-100 с импульсным выходом;

– для измерения разряжения датчики давления вакуума ДМ5001

– для измерения давления ПД100 модели 3х1

– для измерения температуры воды выбираем термо преобразователь с унифицированным выходным сигналом 4...20 мА. ОВЕН ДТС

– для управления регулирующими органами будем использовать преобразователь частоты ОВЕН ПЧВ103-2К2-А.

Для решения задач автоматизации был выбран программируемый контроллер ОВЕН ПЛК154 в соответствии с требованиями, которые предъявляются к современным системам автоматизации.

#### 4.4.4 Выбор контроллера ОВЕН ПЛК154 .

В качестве контроллера для данной системы был выбран контроллер ОВЕН ПЛК 154 – моноблочный контроллер с дискретными и аналоговыми входами/выходами на борту для автоматизации малых систем.

### **Назначение**

- Создание систем управления малыми и средними объектами.
- Построение систем диспетчеризации.
- Управление малыми станками и механизмами

### **Преимущества**

- Компактный корпус с креплением на DIN-рейку.
- Дискретные и аналоговые<sup>1</sup> входы/выходы «на борту» с возможностью расширения их количества путем подключения внешних модулей ввода/вывода по любому из встроенных интерфейсов.

- Скорость работы дискретных входов – до 10 КГц при использовании подмодулей счетчика.

- Большое количество интерфейсов на борту:
  - Ethernet;
  - RS-485;
  - RS-232 Debug;
  - RS-232<sup>2</sup>;
  - USB Device<sup>2</sup>.

Простое и удобное программирование в системе CODESYS V2.3 через порты USB Device<sup>2</sup>, Ethernet, RS-232 Debug.

Контроллер поддерживает работу с нестандартными протоколами по любому из интерфейсов, что позволяет подключать такие устройства как электро-, газо-, водосчетчики, считыватели штрих-кодов и т.п.

Встроенный аккумулятор, позволяющий «пережить» пропадание питания: выполнение программы при пропадании питания и перевод выходных элементов в «безопасное состояние».

Встроенные часы реального времени.

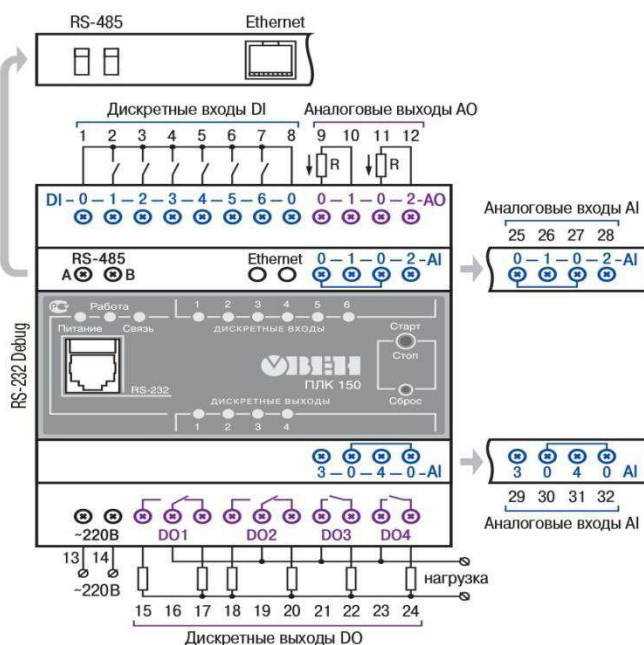


Рисунок 4.6 - Принципиальная схема ПЛК ОВЕН.

#### 4.4.5 Выбор программного обеспечения

Программирование и конфигурирование выполняется стандартными инструментальными средствами пакета **CODESYS (Controller Development System)** — инструментальный программный комплекс промышленной автоматизации. Производится и распространяется компанией 3S-Smart Software Solutions GmbH.

### 4.5 Разработка графического интерфейса

#### 4.5.1 Пакет SCADA ОВЕН Телемеханика ЛАЙТ

Современные SCADA (Supervisor Control And Acquisition System) – системы, служат для сбора и оперативного диспетчерского управления:

- сбор данных о технологическом процессе;
- управление ответственными лицами на основе собранных данных и критериев.

SCADA – система собирает информацию о технологическом процессе, обеспечивает интерфейс с оператором, сохраняет историю процесса, а так же автоматическое управление процессом. [37]

SCADA ОБЕН Телемеханика ЛАЙТ – человеко-машинный интерфейс (HMI) для промышленной автоматизации, управления технологическими процессами и диспетчерского контроля. Активно применяется для создания DCS (распределенных систем управления) и других АСУ. Предоставляет удобные в использовании среду разработки и набор графических средств. Позволяет значительно повысить производительность и эффективность производства. Мощные средства разработки и реализация предоставляют широкие функциональные возможности для быстрого создания и развертывания специальных приложений автоматизации, которые связываются и передают информацию в реальном времени.

Основные задачи, решаемые с помощью SCADA ОБЕН Телемеханика ЛАЙТ :

- сбор сигналов (определяющих состояние производственного процесса в текущий момент времени – температура, давление, положение и т.д.) с промышленной аппаратуры (контроллеры, датчики и т.д.);
- графическое отображение собранных данных на экране компьютера в удобной для оператора форме (на мнемосхемах, индикаторах, сигнальных элементах, в виде текстовых сообщений и т.д.);
- автоматический контроль за состоянием контролируемых параметров и генерация сигналов тревоги и выдача сообщений оператору в

графической и текстовой форме в случае выхода их за пределы заданного диапазона;

- разработка и выполнение (автоматическое или по команде оператора) алгоритмов управления производственным процессом. Сложность алгоритмов не ограничена и может представлять собой любую комбинацию из математических, логических и других операций;

- контроль за действиями оператора путем регистрации его в системе с помощью имени и пароля, и назначения ему определенных прав доступа, ограничивающих возможности оператора (если это необходимо) по управлению производственным процессом;

- автоматическое ведение журнала событий в котором регистрируется изменение производственных параметров с возможностью просмотра в графическом виде записанных данных а также ведение журнала аварийных сообщений;

- соблюдение регламента производственного процесса путем динамической загрузки (автоматически или по команде оператора) набора параметров из заготовленных шаблонов (рецептур) в технологическое оборудование;

- контроль за качеством выпускаемой продукции путем статистической обработки регистрируемых параметров;

- генерация отчетов и оперативных сводок.

Программный пакет ОРМ состоит из двух основных компонентов – среды разработки и среды исполнения. В среде разработки создаются мнемосхемы, определяются и привязываются к аппаратным средствам входные и выходные сигналы и параметры, разрабатываются алгоритмы управления и назначаются права операторов. Созданное таким образом приложение функционирует в среде исполнения. Такое разграничение позволяет предотвратить несанкционированное изменение приложения, не определенное логикой его работы. Для того чтобы приложение могло обмениваться данными с аппаратурой, необходимо использование третьего



компонента – отдельной программы, называемой сервером ввода-вывода. Сервер ввода-вывода, рассчитан на обмен данными согласно определенным промышленным стандартам, которые могут работать со всеми контроллерами удовлетворяющими этому стандарту (Modbus, ProfiBus, DeviceNet и др.).

## 5. Содержательное описание исполнительного устройства

Исполнительное устройство включает:

согласующее устройство СУ (формирует на своем выходе токовый сигнал переменной частоты и фазы в границах 0...50 Гц);

электродвигатель асинхронный с номинальной частотой вращения 25 об/с;

частотный преобразователь;

вентиль с коэффициентом передачи «винт-гайка» равным 0.004 м/об (полное перемещение штока вентиля составляет 0.5 диаметра трубы).

Функциональная схема исполнительного устройства представлена на рисунке 5.1.

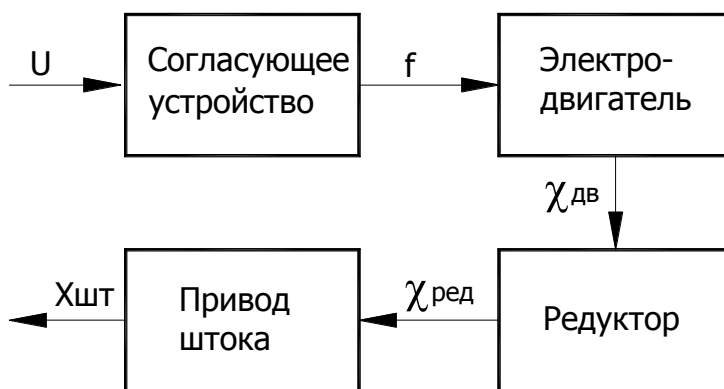


Рисунок 5.1 – Функциональная схема исполнительного устройства.

С.У. – Согласующее устройство (используется преобразователь частоты, на вход которого поступает сигнал управления, сформированный регулятором «u», в виде напряжения  $-10 \dots 0 \dots 10$  В, на выходе формируется ток частотой «f», изменяющейся в пределах  $-50 - 0 - 50$  Гц); Дв. – асинхронный электродвигатель, на вход которого поступает ток переменной частоты, а на выходе формируется угол поворота якоря двигателя « $\psi_{дв}$ » ( $\Psi_{си_{дв}}$ ), пропорциональный частоте тока и времени работы двигателя (принимается, что частота вращения ротора двигателя может изменяться в диапазоне  $-25 \dots 0 \dots 25$  об/с); Ред. – вручную настраиваемый редуктор, выходной вал которого поворачивается на угол « $\psi_{ред}$ » ( $\Psi_{си_{ред}}$ ); В.Г. – привод штока крана “винт-гайка” (« $\psi_{ред}$ »  $\rightarrow$  « $X_{шт}$ »).

## 5.1 Формализация концептуальной модели

Анализ концептуальной модели позволяет отнести объект регулирования к непрерывно-детерминированным моделям .

5.1.1 Составление аналитической модели системы автоматического управления.

### 5.1.2. Модель объекта регулирования

Гидродинамическая установка представляет собой «одноемкостной объект» и может быть описан дифференциальным уравнением первого порядка (формула 5.1) [49]

$$T_a \frac{d}{dt} \varphi(t) + F_d \varphi(t) = \lambda(t),$$

(5.1)

где  $T_a$  – время разгона объекта;

$F_d$  – коэффициент самовыравнивания объекта;

$\varphi$  – относительная величина регулируемого параметра;

$\lambda$  – относительная величина возмущающего воздействия.

Для составления аналитической модели, мы должны связать параметры дифференциального уравнения: время разгона объекта и коэффициент самовыравнивания с физическими параметрами объекта.

Определим время разгона объекта.

Решение задачи начнем с того, что определим высоту столба жидкости над дном резервуара  $H_0$ .

Запишем уравнение баланса в значениях расхода жидкости через краны на притоке  $Q_{пр.ном}$  и оттоке  $Q_{от.ном}$  при номинальных значениях  $\mu$ . (формула 2)

$$\mu_1 f_1 \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{\frac{1}{\gamma} p_1 - Z_0 - p_0} = \mu_2 f_2 \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{Z_0 - \frac{1}{\gamma} p_2 + p_0} ,$$

(5.2)

где  $Z_0$  - уровень жидкости в рассматриваемой гидравлической системе (с учетом противодействия  $P_{2,н}$  на выходе из резервуара).

Рассчитаем численные значения коэффициентов данного уравнения для установившегося режима работы.

$$f_{\text{пр}1} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,325^2}{4} = 0,0829 \text{ м}^2;$$

(5.3)

$$f_{\text{от}2} = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,3^2}{4} = 0,0707 \text{ м}^2;$$

$$\frac{1}{\gamma} \cdot p_1 = \frac{18,93 \cdot 10^6}{9340} = 2026,8 \text{ м}; \quad (5.4)$$

$$\frac{1}{\gamma} \cdot p_2 = \frac{18,9 \cdot 10^6}{9340} = 2024,2 \text{ м}.$$

С учетом вычисленных значений коэффициентов балансовое уравнение примет вид

$$0,22 \cdot 0,0829 \cdot 4,4294 \cdot \sqrt{2026,8 - Z_0 - p_0} = 0,24 \cdot 0,0707 \cdot 4,4294 \cdot \sqrt{Z_0 - 2024,2 + p_0}$$

$$0,0808 \cdot \sqrt{2026,8 - Z_0 - p_0} = 0,0752 \cdot \sqrt{Z_0 - 2024,2 + p_0}$$

Так как данный объект с самовыравниванием то  $P_0$  можно пренебречь.

Разрешив последнее уравнение относительно  $Z_0$ , получим

$$Z_0 = 2024,6 \text{ м}.$$

При этом расход жидкости  $Q_0$ , будет равен

$$Q_{пр.ном} = Q_{от.ном} = Q_0 = 0,078 \text{ м}^3/\text{с}$$

Высота столба жидкости над дном резервуара  $H_0$  будет равна разности между вычисленным значением уровня  $Z_0$  и высотой столба жидкости  $Z_{P2,н}$ , эквивалентного давлению подпора  $P_{2,н}$  на линии.

$$Z_{P2} = \frac{P_{2,н}}{\gamma} \cdot p_2 = \frac{18,9 \cdot 10^6}{9340} = 2024,2 \text{ м}; \quad (5.5)$$

$$H_0 = H_{ном} = Z_0 - Z_{P2,н} = 2024,6 - 2024,2 = 0,4 \text{ м}. \quad (5.6)$$

Площадь поперечного сечения некоторой части резервуара равна

$$S = S_{сектора} - S_{\Delta} = \frac{\pi R^2}{360^\circ} \cdot \alpha - \frac{1}{2} \cdot a \cdot h = \frac{3,14 \cdot 0,8^2}{360^\circ} \cdot 120^\circ - \frac{1}{2} \cdot 1,4 \cdot 0,4 = 0,39 \text{ м}^2. \quad (5.7)$$

Время разгона для объекта равно

$$T_a = \frac{V}{Q_0} = \frac{0,078}{0,05} = 0,641 \text{ с.} \quad (5.9)$$

Определим коэффициенты самовыравнивания на стороне притока жидкости и ее оттока.

Перепишем уравнения притока и оттока жидкости, выразив значение уровня жидкости в гидравлической системе в установившемся состоянии  $Z_0$  через высоту столба жидкости над дном резервуара  $H$  ( $Z_0 = H_0 + 2024,2$ ),

$$Q_{\text{в}} = \mu_1 f_{\text{в}1} \sqrt{2g} \cdot \sqrt{\frac{1}{\gamma} \cdot p_1 - Z_0 - p_0} = \mu_1 f_{\text{в}1} \sqrt{2g} \cdot \sqrt{\frac{1}{\gamma} \cdot p_1 - (H_0 + 1766.6) - p_0};$$

$$Q_{\text{от}} = \mu_2 f_{\text{от}2} \sqrt{2g} \cdot \sqrt{(H_0 + 2024.2) - \frac{1}{\gamma} \cdot p_2 + p_0}.$$

Подставив значения  $f_{\text{тр}1}$ ,  $f_{\text{тр}2}$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$ ,  $\gamma$ , и  $g$  в формулы, получим

$$Q_{\text{от}} = 0.0808 \cdot \sqrt{2026.8 - (H_0 + 2024.2)} = 0.0808 \cdot \sqrt{2.6 - H_0};$$

$$Q_{\text{в}} = 0,0752 \cdot \sqrt{H_0}.$$

Откуда найдем значения коэффициентов самовыравнивания на стороне прихода и оттока жидкости.

$$\left( \frac{\partial Q_{\text{от}}}{\partial H} \right)_0 = \frac{-0.0808}{2\sqrt{2.6 - H_0}} = \frac{-0.0808}{2\sqrt{2.6 - 0.4}} = -0.027, \quad (7.10)$$

$$\left( \frac{\partial Q_{\text{в}}}{\partial H} \right)_0 = \frac{0.0752}{2\sqrt{0.4}} = 0,06.$$

Из полученного определим коэффициент самовыравнивания объекта, который будет равен

$$F_\phi = \frac{H_0}{Q_0} \left[ \left( \frac{\partial Q_{\text{от}}}{\partial H} \right)_0 - \left( \frac{\partial Q_{\text{в}}}{\partial H} \right)_0 \right] = \frac{0.4}{0.05} \cdot [-0.027 + 0.06] = 0.696. \quad (5.11)$$

Дифференциальное уравнение, описывающее объект, будет иметь вид

$$T_a \frac{d}{dt} \varphi(t) + F_{\partial} \varphi(t) = \lambda, \quad (5.12)$$

или 
$$0.6 \cdot \frac{d}{dt} \varphi(t) + F_{\partial} \varphi(t) = \lambda,$$

где  $\lambda(t)$  – относительное возмущение (в долях номинальных значений возмущающих сигналов)

$$\lambda(t) = \lambda_1(t) - \lambda_2(t) = \frac{\mu_1(t) - \mu_{1,н}}{\mu_{1,н}} - \frac{\mu_2(t) - \mu_{2,н}}{\mu_{2,н}};$$

$$\frac{H(t) - H_H}{H_H} = \frac{\Delta H(t)}{H_H}$$

$\varphi(t)$  – относительное отклонение.

При сформированном на выходе модели объекта управления относительном отклонении  $\varphi(t)$  текущее значения уровня жидкости в резервуаре будет равно

$$H(t) = H_0 + \Delta H(t) = H_0 + \varphi(t) \cdot H_0. \quad (5.13)$$

Аналитическое решение дифференциального уравнения будет иметь вид

$$\varphi(t) = \frac{\lambda}{F_{\partial}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{F_{\partial}}{T_a} t} \right) = \frac{\lambda}{0.3} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{0.3}{52.9} t} \right) = 3.33 \cdot \lambda \cdot \left( 1 - e^{-0.006 t} \right). \quad (5.14)$$

Приведем уравнение к канонической форме записи для чего разделим обе части уравнения на  $F_{\partial}$ .

$$\frac{T_a}{F_{\partial}} \cdot \frac{d}{dt} \varphi(t) + 1 = \frac{1}{F_{\partial}} \cdot \lambda(t) \quad \text{или} \quad (T_p + 1) \cdot \varphi(t) = k \cdot \lambda(t). \quad (5.15)$$

Вычислим постоянную времени объекта

$$T = \frac{T_a}{|F_{\partial}|} = \frac{0,641}{0.696} = 0,92 \text{ с}$$

и коэффициент усиления

$$k = \frac{1}{0,696} = 1,43.$$

Тогда для объекта можно записать

$$(2,14 \cdot p + 1) \varphi(t) = 1,43 \cdot \lambda(t).$$

С учетом полученного, передаточная функция объекта управления будет иметь вид

$$W(p) = \frac{1,43}{2,14 \cdot p + 1}.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате исследования были определены следующие методы исследования кавитации в технологических установках.

- а) визуальные и слуховые методы наблюдения;
- б) фотографирование и высокоскоростная съемка;
- в) гидравлические методы, основанные на изменении параметров потока (расхода, скорости, перепада давлений, гидродинамических усилий и т. п.);
- г) акустические методы;
- д) электрические (омические, электроемкостные);
- е) радиоактивные.

2. Обоснованием автоматизации экспериментальной установки послужило:

необходимость повышения точности, качества и удобства снятия показаний в реальном времени всего комплекса величин для изучения процесса кавитации. Полученные данные позволили сделать вывод о возможности использования установки для исследований кавитационных процессов и вывода результатов на ПЭВМ и дальнейшей работы с результатами эксперимента.

3. Для автоматизации установки было предложено следующее оборудование:

– для измерения расхода питательной воды выбираем расходомер ВСХНд-100 с импульсным выходом;

– для измерения разряжения датчики давления вакуума ДМ5001

– для измерения давления ПД100 модели 3х1



– для измерения температуры воды выбираем термо преобразователь с унифицированным выходным сигналом 4...20 мА. ОВЕН ДТС

– для управления регулирующими органами будем использовать преобразователь частоты ОВЕН ПЧВ103-2К2-А.

Для решения задач автоматизации был выбран программируемый контроллер ОВЕН ПЛК154 в соответствии с требованиями, которые предъявляются к современным системам автоматизации.

4. В ходе работы сформирована модель объекта регулирования:

$$T_a \frac{d}{dt} \varphi(t) + F_d \varphi(t) = \lambda(t)$$

С учетом полученного, передаточная функция объекта управления будет иметь вид

$$W(p) = \frac{3.33}{176.3 \cdot p + 1}.$$

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пирсол И.С. Кавитация: пер. с англ. М.: Мир, 2012. 98 с.
2. Смородов Е.А., Галиахметов Р.Н., Ильгамов М.А. Физика и химия кавитации. М.: Наука, 2008. 226 с.
3. Окслер Г. Что такое кавитация? // Арматуростроение. 2012. № 3 (78). с. 70-73.
4. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация: пер. с англ. М.: Мир, 1974. 687 с.
5. Маргулис М.А. Сонолюминесценция // Успехи физических наук. 2000. № 3 (170). с. 263-287. DOI: 10.3367/UFNr.0170.200003с.0263
6. Пильгунов В.Н. Исследование разрывной прочности минерального масла // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 5. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/370692.html> (дата обращения 01.02.2016).
7. Bertholet M. Sur quelquesphenomenes de dilatation forcee des liquids. Ann.de Chimie et de Physique, 30,322 et Seq.,1850.
8. Dixon H.H. Note on the tensile strength of water, Sci. Proc. Royal Dublin Soc.,12 (N.S.), 1909.
9. Meyer J., ZurKenntnis des NegativenDruckes in Flussigkeiten, Abhandl.Deut.BunsenGes. III, №1, 1911.
10. Rees E.P., Trevena D.H. Cavitation thresholds in liquids under static conditions, ASME Cavitation Forum, p.12, 1966.
11. Scott A.F. и др., Study of the Bertholet method for determining the tensile strength of a liquid, Jr. Chem. Phys., 16, 1948.
12. Vincent R.S. Examining of the Bertholet method of measuring tensin in liquids, Proc. Phys. Soc (London), 55,1943.
13. Briggs L.J. Maximum superheating of water as a measure of negative pressure, Jr. Appl. Phys., 26, 1955.

14. Davies R.M. и др. The tensile strength of liquids under dynamic stressing, Proc. 1955 NPL Symp. on cavitation in hydrodynamics, Paper 5, 1956.

15. Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б. Метод определения динамической прочности жидкости / А.Ю. Радзюк, Е.Б. Истягина // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – Красноярск, 2016. – С. 44-47.

16. Кулагин, В.А. Изучение кинетики получения ультрадисперсных алмазов с помощью вибрационной (ультразвуковой) и гидродинамической кавитации / В.А. Кулагин, В.Л. Королев // Вестник КГТУ. Красноярск: КГТУ. – 1997. – № 8. – С. 61–66.

17. Арзуманов Э. С., Ловцов Е.Н. Использование акустического эффекта при исследовании кавитации в регулирующих клапанах. «Труды института НИИавтоматика», 1968, вып. 36

18. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. акад. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976.

19. Витенько, Т. Н. Механизм активирующего действия гидродинамической кавитации на воду / Т. Н. Витенько, Я. М. Гумницкий // Химия и технология воды. – 2007. – Т. 29. – № 5. – С. 422–432.

20. Кулагин, В. А. Гидрофизика / В. А. Кулагин, Б. Ф. Турутин, А. И. Матюшенко. ИПЦ КГТУ – Красноярск ИПЦ КГТУ, 2000. – 243 с.

21. Седов, Л.И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. -М.: Наука, 1973.-Т. 1 и 2. –536 с., 584 с.

22. Перник А. Д. Проблемы кавитации. Л., «Судостроение», 1966. 440 с.

23. Рахматулин Ш. И., Колпаков Л. Г. К вопросу о выборе давления паров при кавитации нефтей. — «Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов», 1971, №8, с.58—61.

24. Кулагин, В. А. Повышение энергоэффективности водоподготовки на ТЭС и котельных с использованием кавитационной технологии / В. А. Кулагин, А. С. Кривоуццкий // Энергосбережение и водоподготовка. – 2007. – № 4. – С. 85–88.

25. Шальнев К. К. Кавитация в гидродинамике. — «Известия АН СССР. ОТН», 1956, № 8, с. 10—92.
26. Minelli G. Sulla determinazione de la pressione di formazione di vountineilquide. — «Technicaitaliana», 1967, vol. 32, № 11, p. 763—768.
27. Ress E. P., Trevena D. H. The effects of temperature and viscosity on the critical tensions of liquids. — «Cavitation Forum», Chicago, 1967, May 8, p. 1—3.
28. Евстигнеев В. В. Кавитация в технологиях очистки сточных вод. / В. В. Евстигнеев, В. А. Кулагин // В мире научных открытий. 2010. - № 5 (11). Ч. I. – С. 87-90.
29. Пешкин М. А. Кавитационные характеристики местных сопротивлений трубопроводов. — «Теплоэнергетика», 1960, №12, с. 59—62.
30. Физический энциклопедический словарь. М., «Советская энциклопедия», 1960, т. I, с. 664.
31. Башта Т. М. и др. Объемные гидравлические приводы. Под ред. Т. М. Башта, М., «Машиностроение», 1968, 628 стр.
32. Исаков А.Я. Молекулярная физика и термодинамика. Руководство по самостоятельной работе: – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007. – 343 с.
33. ГОСТ 2.303-68. Линии [Текст]. – Взамен ГОСТ 3456-59; введ. 01-01-71. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – С. 6-11. - (Единая система конструкторской документации).
34. ГОСТ 2.304-81. Шрифты чертежные [Текст]. – введ. 01-01-82. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – С 12-32. - (Единая система конструкторской документации).
35. ГОСТ 2.701-84. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению [Текст]. – Взамен ГОСТ 2.701-79; введ. 01-07-85. – М.: Изд-во стандартов
36. ГОСТ 21.404-85. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах [Текст]. –

введ. 01-07-71. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 10 с. – (Система проектной документации для строительства).

37. Матвейкин, В.Г. Применение SCADA – систем при автоматизации технологических процессов [Текст]: учеб. пособие / В.Г. Матвейкин, С.В. Фролов, М.Б. Шехтман. – М.: Машиностроение, 2000. – 176 с.

38. Драчев, В.А. Электромеханические системы автоматики: Электропривод: расчет, выбор и управление. Пособие к выполнению курсового и дипломного проектирования для студентов специальности 210200 всех форм обучения. Часть 2 [Текст] / В.А Драчев. – Красноярск: СибГТУ, 2005. – 200 с.

39. SCADA ОВЕН Телемеханика ЛАЙТ - руководство пользователя. [Электронный ресурс]. – Automated Solutions. Каталог продукции, 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

40. ОВЕН ПЛК 154 – совместимый программируемый микроконтроллер. Руководство пользователя. [Электронный ресурс]: Prosoft. Каталог продукции – Россия. – 2017. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

41. Руководство по программированию с помощью UltraLogic32. [Электронный ресурс]: Prosoft. Каталог продукции – Россия. – 2009. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

42. Регулирующая арматура [Электронный ресурс]: Справочник-каталог. – «АБС ЗЭиМ автоматизация», 20019. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

43. Датчики давления ОВЕН – 55. Техническое описание и инструкция по эксплуатации [Текст]. – Челябинск.: Промышленная группа “ОВЕН”, 20018. – 70с.

44. Датчики температуры [Электронный ресурс]: Тематический каталог № 2. – Челябинск.: Промышленная группа “ ОВЕН ”, 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

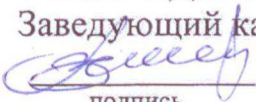
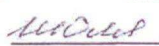
47. Датчики расхода переменного перепада давления [Электронный ресурс]: Тематический каталог №4. – Челябинск.: Промышленная группа “ОВЕН”, 2009.

48. Программный пакет ADAMView [Электронный ресурс]: Каталог продукции. Advantech. – США, 2009. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

49. Скурихин, В. И. Математическое моделирование: учеб. пособие для вузов. [Текст] / В.И. Скурихин, В.Б. Шифрин, В.В. Дубровский. - К., Техника, 1983. – 270 с.,

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Политехнический

институт  
Теплотехники и Гидрогазодинамики  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
 В. А. Кулагин  
подпись инициалы, фамилия  
« 02 »  2020 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Система автоматического регулирования кавитационной гидродинамической  
установки

тема

13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

код и наименование направления

13.04.01.01 Энергетика теплотехнологий

код и наименование магистерской программы

Научный  
руководитель

  
подпись, дата

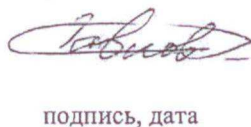
к.т.н., доцент

А.Ю. Радзюк

должность, ученая  
степень

инициалы, фамилия

Выпускник

  
подпись, дата

П.В. Павлов

инициалы, фамилия

Рецензент

  
подпись, дата

д-р техн. наук

Ю.Л. Липовка

должность, ученая  
степень

инициалы, фамилия

Красноярск 2020г.