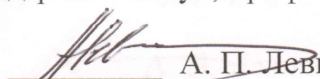


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Н.П. ОГАРЁВА»

Институт механики и энергетики
Кафедра теплоэнергетических систем

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой
д-р техн. наук, проф.


(подпись) А. П. Левцев

«21» 06 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУЙНОГО КАВИТАТОРА В
ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Автор магистерской диссертации  А.Е. Давыдов

Обозначение магистерской диссертации МД-02069964-13.04.01-07-18

Направление 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Руководитель работы


д-р техн. наук, проф.



А.П. Левцев

Нормоконтролер

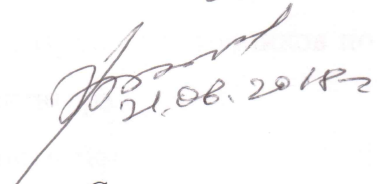
ст. преподаватель

21.06.18 

А.И. Лысяков

Рецензент

д-р техн. наук, проф.


21.06.2018г

В.Н.Водяков

Саранск


2018

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Н.П. ОГАРЁВА»

Институт механики и энергетики
Кафедра теплоэнергетических систем

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой
д-р техн. наук, проф.

 А. П. Левцев
(подпись)

« 19 » 10 2016 г.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
(в форме магистерской диссертации)

Студент Давыдов Александр Евгеньевич

1 Тема: Исследование струйного кавитатора в импульсном режиме

Утверждена приказом № 8810-с от 19.10.2016

2 Срок представления работы к защите 27.06.2018

3 Исходные данные для научного исследования (проектирования):
техническая документация, диссертационные работы, статьи, СНиПы,
ГОСТы, РД.

4 Содержание выпускной квалификационной работы

- 4.1 Обзор и анализ литературных источников по проблеме повышения эффективности струйного кавитатора
- 4.2 Теоретические предпосылки
- 4.3 Экспериментальная установка

4.4 Обработка результатов экспериментального исследования

Руководитель работы


подпись, дата

А.П. Левцев
инициалы, фами

Задание принял к исполнению

подпись, дата



РЕФЕРАТ

Пояснительная записка содержит 74 листа, 20 таблиц, 33 рисунков, 62 формулы, 33 использованных источников.

КАВИТАТОР, КАВИТАЦИЯ, УДАРНЫЙ УЗЕЛ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ИМПУЛЬСНАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ, ИЗМЕРЕНИЕ, ДАВЛЕНИЕ, ТЕМПЕРАТУРА.

Объектом разработки является установка для исследования струйного кавитатора.


Цель работы – исследование струйного кавитатора с импульсной циркуляцией теплоносителя.

В процессе работы проводилось теоретическое и практическое исследование кавитатора.

В результате проведенной работы:

- разработана математическая модель опытной установки;
- разработана функциональная схема лабораторной установки;
- изготовлена экспериментальная установка и проведены испытания.

МД-02069964-13.04.01-07-18

№ п/п	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Давыдов А.Е.			Исследование струйного кавитатора в импульсном режиме	Лит.	Лист	Листов
Проект.		Левцев А.П.				3	74	
Контр.		Лысяков А.И.		21.06.18	Пояснительная записка	ИМЭ, каф. ТЭС, д/о, 213 гр		
Испол.		Левцев А.П.		21.06.18				

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. Обзор и анализ литературных источников по проблеме повышения эффективности струйного кавитатора.	6
1.1 Общие сведения о струйных кавитаторах и особенности их использования	6
1.2 Анализ конструктивных и схемных решений	8
1.3 Основные показатели кавитаторов и методы их оценки	12
1.4 Цель и задачи исследования	14
2 Теоретические предпосылки	16
2.1 Разработка математической модели теплогидравлического преобразователя	16
2.2 Выбор параметров модели и результаты моделирования	20
3 Экспериментальная установка	30
3.1 Описание экспериментальной установки	30
3.2 Автоматизированная система сбора данных	37
3.3 Составление теплового баланса для выбранной схемы	38
4 Обработка результатов экспериментального исследования	40
4.1 Методика и программа проведения эксперимента	40
4.2 Обработка экспериментальных данных	42
4.3 Проверка адекватности математической модели по результатам экспериментальных данных	56
4.4 Проведение полного факторного эксперимента	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	69
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	71

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время очень большое внимание уделяется альтернативным (возобновляемым и не возобновляемым) источникам энергии. Это связано с двумя причинами высокие цены на энергоносители и с ухудшением экологической обстановки в мире. Очень остро встает вопрос о том, что современное поколение оставит своим потомкам после себя.

Использование различных альтернативных источников становится все более распространенным. Редко какой хозяин не пытается сэкономить на отоплении или потреблении еще каких-либо благ, которые с каждым годом становятся все дороже и дороже. Чтобы сделать экономной отопительную систему жилого или производственного помещения, многие люди прибегают к помощи различных схем и методам получения тепловой энергии. Один из аппаратов, подходящий под эти цели – кавитатор. Этот аппарат является альтернативной заменой любого отопительного котла. В нем нагрев воды осуществляется за счет кавитации, в процессе которой в жидкости образуются свободные места, заполняемые пузырьками. Он возникает за счет снижения давления, происходящего в результате увеличения скорости прохождения акустической волны. Однако есть и другие объяснения происхождения. С физической точки зрения этот процесс можно сравнить с закипанием воды.

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

1 Обзор и анализ литературных источников по проблеме повышения эффективности струйного кавитатора

1.1 Общие сведения о струйных кавитаторах

В настоящее время очень большое внимание уделяется альтернативным (возобновляемым и не возобновляемым) источникам энергии. Это связано с двумя причинами высокие цены на энергоносители и с ухудшением экологической обстановки в мире. Очень остро встает вопрос о том, что современное поколение оставит своим потомкам после себя.

Использование различных альтернативных источников становится все более распространенным. Одним из таких источников, работа которого основана на совершенно новом принципе получения энергии, является кавитатор[1]. В настоящее время производство этих аппаратов осваивают многие производители, и они в большом количестве появляются на отечественном рынке.

Этот аппарат является альтернативной заменой любого отопительного котла. В нем нагрев воды осуществляется за счет кавитации, в процессе которой в жидкости образуются свободные места, заполняемые пузырьками. Он возникает за счет снижения давления, происходящего в результате увеличения скорости прохождения акустической волны. Однако есть и другие объяснения происхождения. С физической точки зрения этот процесс можно сравнить с закипанием воды [2].

Работа этого устройства достаточно проста. Основным узлом в нем является кавитационный теплогенератор, со специальным профилем проточной части. Проходя через него, вода нагревается. Происходит это за счет формирования вихревого потока. Возникая в нем, кавитационные

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

разрывы приводят к нагреву жидкости. В таком аппарате роль теплоносителя может выполнять практически любая жидкость [3,4].

Струйные кавитаторы предназначены для оказания мощного кавитационного воздействия на прокачиваемую через них среду. Принцип работы струйного кавитатора основан на явлении гидродинамической кавитации, а сам аппарат не имеет движущихся частей и характеризуется относительно невысоким гидродинамическим сопротивлением[5,6,7]. Использование струйного кавитатора делает экономически эффективным промышленное применение ряда ультразвуковых технологий, ранее используемых в ограниченных количествах из-за дороговизны оборудования или невозможности достижения требуемого уровня мощности воздействия.

Основные преимущества струйного кавитатора:

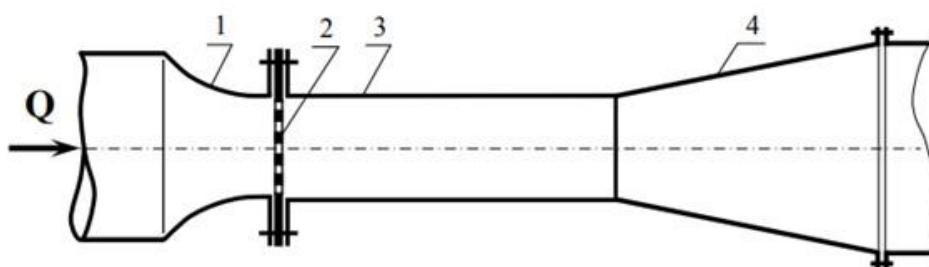
- малое потребление энергии;
- небольшие удельные размеры;
- отсутствие износа, возможность применений в непрерывных и циклических технологических процессах;
- невысокая стоимость;
- низкие эксплуатационные затраты.

В современном мире струйный кавитатор так же может применяться для распыления и устойчивого сжигания обводненных мазутов в энергетике водоочистки, за счет проведения сонохимических реакций между кислородом воздуха и растворимыми в воде загрязняющими примесями. Перспективно применение струйных кавитационных аппаратов вместо диссольверов в лакокрасочной промышленности для тонкого диспергирования компонентов ЛКМ, в пищевой промышленности, в частности для обработки молока с целью увеличения его сроков хранения, а также во многих других областях[8,9].

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

1.2 Анализ конструктивных и схемных решений

Рассмотрим некоторые схемные решения кавитаторов. На рисунке 1 представлена принципиальная схема гидродинамического кавитационного устройства для дезинтеграции жидких пищевых сред [10,11], состоящего из подводящего конфузора 1, кавитатора (сопла) 2, рабочей камеры (горловины) 3 и диффузора 4. Смешиваемый поток поступает в конфузор 1, где происходит его разгон и снижение давления. Далее поток из конфузора 1 попадает на кавитатор 2 (многоструйное сопло), который обеспечивает формирование высокоскоростных струй. На выходе кавитатора происходит резкое падение давления до давления насыщенного пара. Это падение давления приводит к переводу части жидкой фазы в парообразную и образованию, тем самым, сверхзвукового двухфазного потока. В рабочей камере 3 происходит торможение сверхзвукового потока и его переход в дозвуковой в скачке давления. После рабочей камеры поток поступает в диффузор 4, где часть кинетической энергии потока преобразуется в потенциальную. Давление при этом повышается до значения меньшего, чем перед эмульгатором [12].



1 – конфузор; 2 – кавитатор (сопло); 3 – рабочая камера; 4 – диффузор

Рисунок 1 – Гидродинамическое кавитационное устройство для дезинтеграции пищевых сред

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

На рисунке 2 показан кавитатор типа Фьюсоник [13,14].

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

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

Эти недостатки не компенсируются такими преимуществами как:

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

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

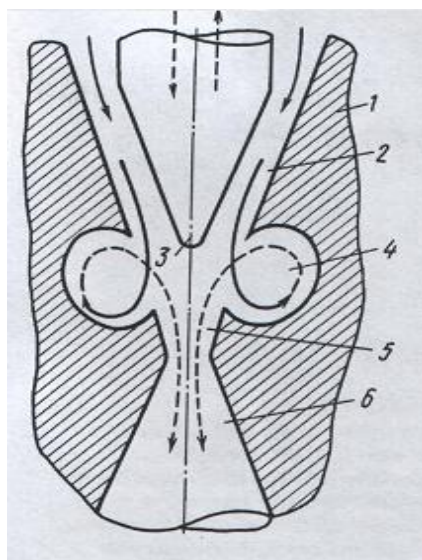


Рисунок 2 – Кавитатор типа Фьюсоник

На рисунке 3 показана схема лопастного кавитатора.

Лопастные кавитаторы представляют собой трубу в которой протекает жидкость, в жидкости вращается крыльчатка определенного профиля[15,16]. Кавитация возникает за счет разрежения потока за лопастью. Кавитация более интенсивная по сравнению с кавитаторами типа Фьюсоник за счет многократности возникновения кавитации в единице объема.

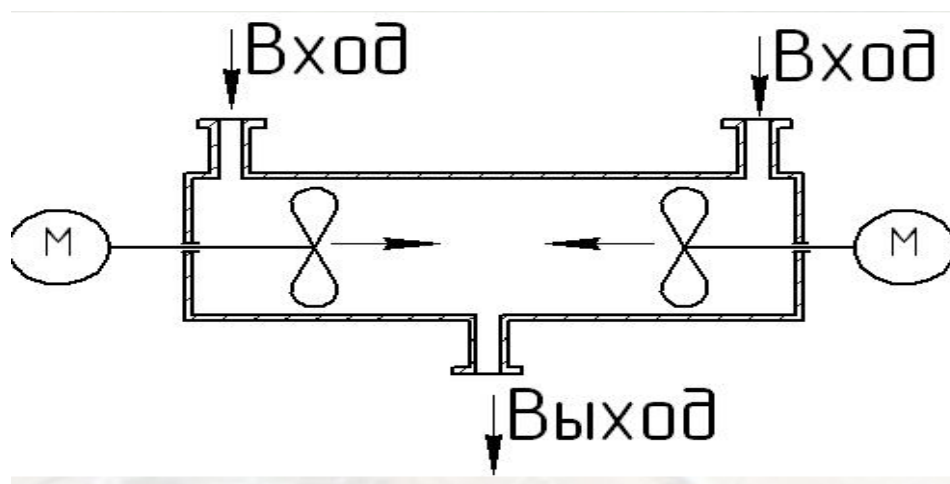


Рисунок 3 – Схема лопастного кавитатора

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

МД-02069964-13.04.01-07-18

Лист

10

На рисунке 4 показана схема кавитатора для тепловыделения в жидкости[17].

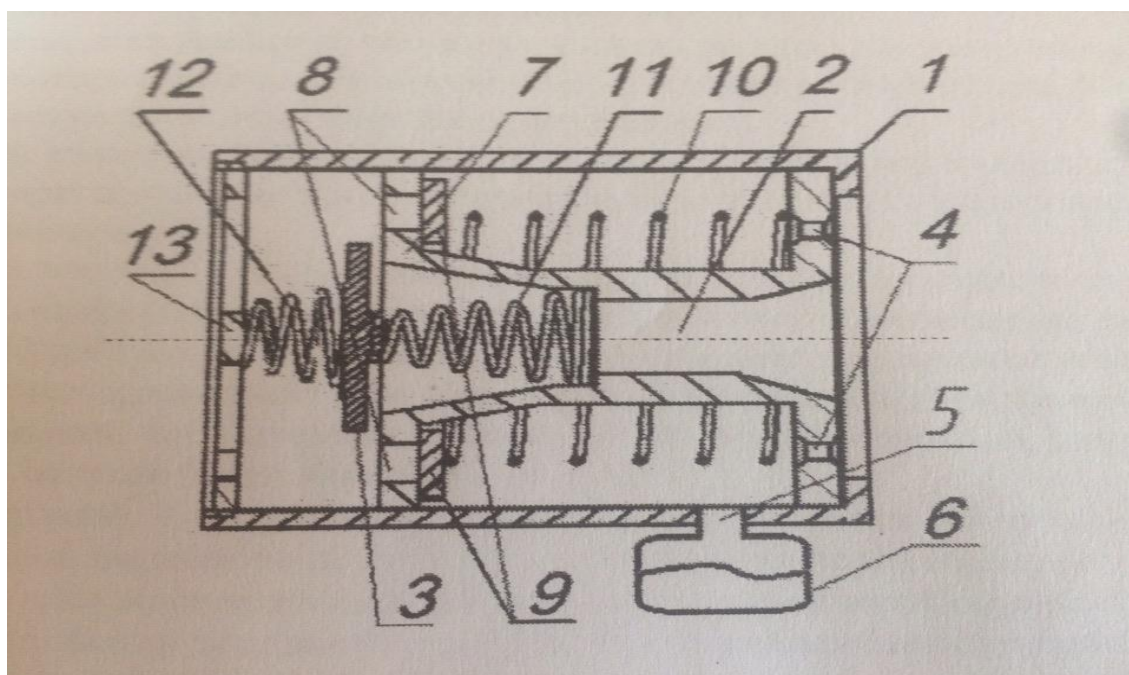


Рисунок 4 – Схема кавитатора для тепловыделения в жидкости

Кавитатор для тепловыделения в жидкости работает следующим образом: со стороны расположения ударного клапана 3 в корпус 1 осуществляют подачу холодной жидкости, подлежащей нагреву, а со стороны расположения боковых трубок Вентури 4 от корпуса 1 устройства осуществляют отбор нагретой жидкости для удовлетворения различной тепловой нагрузки. При известном значении скорости истечения жидкости через осевую трубку вентури 2, в которой происходит ее кавитация, сопровождающаяся выделением тепла, ударный узел 3 увлекается движущимся потоком и закрывается. В этот момент времени кавитация в осевой трубки Вентури 2 прекращается, а со стороны закрытого ударного клапана 3 возникает импульс количества движения холодной жидкости, который, в фазу положительной волны гидравлического удара, обеспечит ее поступление через сквозные отверстия 8 и обратный клапан 9 в полость,

образованную корпусом 1, Н-образной цилиндрической катушки 7, сквозным каналом 5 и гидроаккумулятором 6, откуда холодная жидкость поступает в боковые трубки вентури 4 для последующего подогрева. Когда положительная волна гидравлического удара сменится отрицательной, возвратная пружина 10, прижимая обратный клапан 9, закрывает проходное сечение сквозных отверстий 8, сохраняя запасенное избыточное давление в гидроаккумуляторе 6, откроется ударный клапан 3 и будет происходить подогрев холодной жидкости, теперь уже и в осевой трубки вентури 2, одновременно с подогревом холодной жидкости, вытесняемой гидроаккумулятором 6 в боковые трубки Вентури 4. Движение ударного клапана 3 на открытие и закрытие относительно корпуса 1 происходит при сжатии-растяжении малой конической пружины 12 и большой конической пружины 11, между которыми зажат ударный клапан 3. Центрирование малой конической пружины 12 в корпусе 1 обеспечивается за счет стопорного кольца 13, жестко закрепленного в корпусе 1. Использование этих двух конических пружин позволяет обеспечить движение ударного клапана 3 в трех степенях свободы относительно корпуса 1 и исключить механическое трение ударного клапана 3 о направляющие его вспомогательные устройства, которые в предлагаемом техническом решении отсутствуют.

1.3 Основные показатели кавитаторов и методы их оценки

Кавитационное течение характеризуют безразмерным параметром – числом кавитации:

$$X = \frac{2(P - P_s)}{\rho v^2}, \quad (1)$$

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

где P – гидростатическое давление набегающего потока, Па;

P_s – давление насыщенных паров жидкости при определенной температуре окружающей среды, Па;

ρ – плотность среды, кг/м³;

v – скорость потока на входе в систему, м/с.

Известно, что кавитация возникает при достижении потоком граничной скорости, когда давление в потоке становится равным давлению парообразования (насыщенных паров). Этой скорости соответствует граничное значение критерия кавитации. В зависимости от этой величины можно различать 4 вида потоков:

- 1) Докавитационный – сплошной (однофазный) поток, при $X > 1$;
- 2) Кавитационный (двухфазный) поток, при $X = 1$;
- 3) Пленочный – с устойчивым отделением кавитационной полости от остального сплошного потока (пленочная кавитация), при $X < 1$;
- 4) Суперкавитационный – при $X \ll 1$.

В таблице 1 показаны методы оценки эффективности кавитации.

Таблица 1 – Методы оценки эффективности кавитации [18].

Наименование	Описание	Преимущества	Недостатки
Прямые			
Акустические	Измерение давления непосредственно в самокавитаторе, замер шума	Легко поддается автоматизации, возможность обработки больших объемов воды	Требует специализированного оборудования, более высокая энергоемкость.
Визуальные	Фото- и видеосъемка процесса кавитации	Визуальное фиксирование процесса кавитации	Высокая стоимость, трудоемкость.

Окончание таблицы 1

Косвенные			
Механические	Измерение величины кавитационной эрозии	Затраты ручного труда минимальны	Длительное время фиксирования процесса, требует специализированного оборудования
Гидродинамические	Измерение гидродинамических параметров потока жидкости, связанных с интенсивностью вавитации	Легко поддаются автоматизации, минимализация ручного труда	Высокая энергоемкость, требует специализированного оборудования
Технологические	Изменения качественных показателей, обрабатываемой среды	Легко поддаются автоматизации, минимализация ручного труда	Высокая стоимость, требует совмещения методов для фиксирования эффективности процесса
Химические	Исследования изменения массы, концентрации или объема химических реагентов за счет химических реакций	Удобен при экспресс-определении	Необходимость в реагентах, быстро теряют активность

1.4 Цели и задачи исследования

Обзор и анализ литературных источников по проблеме повышения эффективности струйного кавитатора показал, что существует множество конструктивных решений струйных кавитаторов и они постоянно совершенствуются. Однако получить эффективную конструкцию (эффект 40% и выше) струйного кавитатора пока не получилось. Это обусловлено сложностью поддержания гидродинамических процессов. Одним из

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

перспективных направлений повышения эффективности струйного кавитатора является включение его в контур с импульсной циркуляцией теплоносителя.

Целью данной работы является повышение энергоэффективности струйного кавитатора на основе прерывания потока, за счет включения его в импульсную систему подачи теплоносителя[19].

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать существующие конструктивные решения повышения эффективности струйного кавитатора;
- разработать схему включения кавитатора в импульсную систему теплоснабжения;
- провести испытания опытного образца кавитатора;
- разработать математическую модель теплогидравлического преобразователя;
- проверить адекватность математической модели струйного кавитатора в импульсной системе теплоснабжения по результатам экспериментальных данных.

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

2 Теоретические предпосылки

2.1 Разработка математической модели теплогидравлического преобразователя

Рассмотрим простейшую энергетическую цепь [20] струйного кавитатора, представленную на рисунке 5.

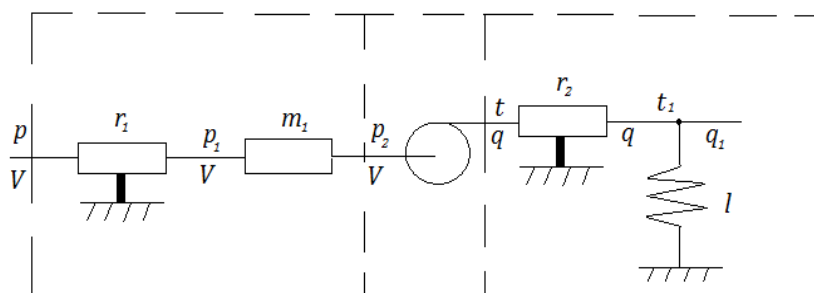


Рисунок 5 – Энергетическая цепь струйного кавитатора

Данная цепь включает в себя три звена: первое звено гидравлическое, учитывающее потери на трение потока с помощью активного сопротивления r_1 , инерционные свойства потока – массой жидкости в трубопроводе m_1 ; второе звено – преобразовательное, идеально преобразует давление p_2 и объёмный расход v жидкости на входе кавитатора в температуру t и удельный тепловой поток q ; третье звено тепловое учитывает потери тепла в окружающую среду и аккумуляцию теплового потока податливостью L .

Уравнение звеньев цепи:

1-е

2-е

3-е

$$\begin{cases} p = r_1 v^2 + m^1 \dot{v} + p_2, \\ v = v. \end{cases}$$

$$\begin{cases} t = p_2 |c \rho k_1|, \\ q = v_0 c \rho k_2. \end{cases}$$

$$\begin{cases} t = r_2 q + t_1, \\ q = l \dot{t}_1 + q_1. \end{cases}$$

Нас интересует выход цепи в виде «чёрного» ящика, показанный на рисунке 6, для которого ниже будет составлена частотная функция, как отношение выхода ко входу:

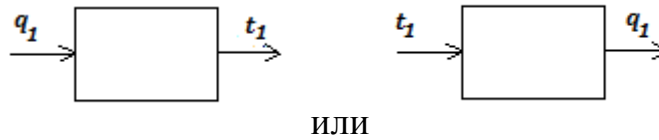


Рисунок 6 – Изображение входных и выходных переменных в виде «чёрного» ящика

где c – теплоёмкость, КДж/кг·°С;

ρ – плотность воды, кг/м³;

k_1 – коэффициент усиления по давлению;

k_2 – коэффициент усиления по расходу.

Представим выходные переменные $t_1 = t_{10} + \bar{t}_1$, $q_1 = q_{10} + \bar{q}_1$ в виде постоянной составляющей и отклонения.

В начале запишем уравнение на ρ_2 :

$$\rho_2 = c\rho k_1 t = c\rho k_1 r_2 q + c\rho k_1 t_1 = c\rho k_1 r_2 l \dot{t}_1 + c\rho k_1 r_2 q_1 + c\rho k_1 t_1. \quad (2)$$

Уравнение на V :

$$V = \frac{1}{c\rho k_2} q = \frac{l}{c\rho k_2} [(r_2 \dot{\bar{q}} + \dot{\bar{t}}_1) + q_0 + \bar{q}_1] = \frac{l r_2}{c\rho k_2} \dot{\bar{q}} + \frac{l}{c\rho k_2} \dot{\bar{t}}_1 + \frac{l}{c\rho k_2} q_0 + \frac{l}{c\rho k_2} \bar{q}_1. \quad (3)$$

Уравнение на \dot{V} :

$$\dot{V} = \frac{lr_2}{c\rho k_2} \ddot{\bar{q}}_1 + \frac{l}{c\rho k_2} \ddot{\bar{t}}_1 + \frac{l}{c\rho k_2} \dot{\bar{q}}_1. \quad (4)$$

Уравнение на V^2 :

$$V^2 = \frac{l^2}{l^2\rho^2k_2^2} q_0^2 + 2 \frac{l}{c\rho k_2} q_0 \left(\frac{lr_2}{c\rho k_2} \dot{\bar{q}}_1 + \frac{l}{c\rho k_2} \dot{\bar{t}}_1 + \frac{l}{c\rho k_2} \bar{q}_1 \right). \quad (5)$$

Уравнение на t :

$$\begin{aligned} t = & \frac{r_1 l^2}{c^2 \rho^2 k_2^2} q_0^2 + 2 \frac{r_1 l}{c\rho k_2} q_0 \left(\frac{lr_2}{c\rho k_2} \dot{\bar{q}}_1 + \frac{l}{c\rho k_2} \dot{\bar{t}}_1 + \frac{l}{c\rho k_2} \bar{q}_1 \right) + \frac{mlr_2}{c\rho k_2} \ddot{\bar{q}}_1 + \\ & + \frac{ml}{c\rho k_2} \ddot{\bar{t}}_1 + \frac{ml}{c\rho k_1} \dot{\bar{q}}_1 + c\rho k_1 r_2 \dot{\bar{t}}_1 + c\rho k_1 r_2 \bar{q}_1 + c\rho k_1 \bar{t}_1 = \\ & \frac{ml}{c\rho k_2} \ddot{\bar{t}}_1 + (c\rho k_1 r_2 l + \frac{2r_1 l^2}{c^2 \rho^2 k_2^2} q_0) \dot{\bar{t}}_1 + c\rho k_1 \bar{t}_1 + \frac{mlr_2}{c\rho k_2} \ddot{\bar{q}}_1 + \left(\frac{ml}{c\rho k_1} + \frac{lr_2}{c\rho k_2} \right) \dot{\bar{q}}_1 + \\ & + \left(\frac{l}{c\rho k_2} + c\rho k_1 r_2 \right) \bar{q}_1 + \frac{r_1 l^2}{c^2 \rho^2 k_2^2} q_0^2 = a_1 \ddot{\bar{t}}_1 + a_2 \dot{\bar{t}}_1 + a_3 \bar{t}_1 + b_1 \ddot{\bar{q}}_1 + b_2 \dot{\bar{q}}_1 + b_3 \bar{q}_1 + \\ & + b_4 \end{aligned} \quad (6)$$

Значение коэффициентов:

$$\begin{aligned} a_1 = \frac{ml}{c\rho k_2}, \quad a_2 = c\rho k_1 r_2 l + \frac{2r_1 l^2}{c^2 \rho^2 k_2^2} q_0, \quad a_3 = c\rho k_1, \\ b_1 = \frac{mlr_2}{c\rho k_2}, \quad b_2 = \frac{ml}{c\rho k_1} + \frac{lr_2}{c\rho k_2}, \quad b_3 = \frac{l}{c\rho k_2} + c\rho k_1 r_2. \end{aligned} \quad (7)$$

Запишем на изображения:

$$(a_1 s^2 + a_2 s + a_3) \cdot T_1(s) = -(b_1 s^2 + b_2 s + b_3 + 1) Q_1(s). \quad (8)$$

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

Комплексное сопротивление цепи:

$$Z(s) = \frac{T_1(s)}{Q_1(s)} = \frac{-b_1s^2 - b_2s - b_3 - 1}{a_1s^2 + a_2s + a_3}. \quad (9)$$

Частотная функция цепи:

$$Z(j\Omega) = \frac{b_1\Omega^2 - b_2j\Omega - b_3 - 1}{-a_1\Omega^2 + a_2j\Omega + a_3} = \frac{[b_1\Omega^2 - b_2j\Omega - b_3 - 1] \cdot [(a_1\Omega^2 + a_3) - a_2j\Omega]}{(-a_1\Omega^2 + a_3)^2 - a_2^2\Omega^2} \quad (10)$$

Действительная часть:

$$\operatorname{Re}(j\Omega) = \frac{-b_1a_1\Omega^4 + b_1a_3\Omega^2 - b_2a_2\Omega^2 + b_3a_1\Omega^2 - b_3a_3 + a_1\Omega^2 - a_3}{(-a_1\Omega^2 + a_3)^2 - a_2^2\Omega^2} \quad (11)$$

Мнимая часть:

$$\operatorname{Im}(j\Omega) = \frac{b_1a_2\Omega^3 + b_2a_1\Omega^3 - b_2a_3\Omega + b_3a_2\Omega + a_2\Omega}{(-a_1\Omega^2 + a_3)^2 - a_2^2\Omega^2}. \quad (12)$$

Амплитудно-частотная характеристика цепи:

$$A(\Omega) = \sqrt{\operatorname{Re}(j\Omega)^2 + \operatorname{Im}(j\Omega)^2} \quad (13)$$

Фазо-частотная характеристика:

$$\varphi(\Omega) = -\operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Re}}{\operatorname{Im}} \quad (14)$$

2.2 Выбор параметров модели и результаты моделирования

Для построения амлитудно-частотной и фазо-частотной характеристик определяем параметры энергетической цепи.

Определение параметров энергетической цепи:

$$1) r_1 = 100, r_2 = 0,05, m^1 = 300, c = 4,187, \rho = 1000, k_1 = 1,3,$$

$$k_2 = 1, l = 2, q_0 = 0,27$$

Таблица 2 – Исходные данные для расчета частотных характеристик

a ₁	a ₂	a ₃	b ₁	b ₂	b ₃
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16

Таблица 3 – Результаты расчета частотных характеристик

A1	A2	A3	B1	B2	B3	Omega	Re	Im	A	F
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	1	-0,05069	0,005049	0,050944	0,099274
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	5	-0,06701	0,033402	0,074874	0,462409
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	10	9,552555	-9,54971	0,1189	0,785249
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	15	0,03967	-0,05976	0,071732	0,984798
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	16	0,031802	-0,05116	0,060242	1,014663
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	17	0,026255	-0,04493	0,052042	1,042001
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	18	0,022153	-0,0402	0,045897	1,067089
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	19	0,019011	-0,03646	0,04112	1,090169
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	20	0,016537	-0,03343	0,037299	1,111455
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	21	0,014545	-0,03092	0,034173	1,131135
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	22	0,012912	-0,0288	0,031566	1,149373
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	23	0,011554	-0,02699	0,029359	1,166314
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	24	0,010409	-0,02542	0,027465	1,182086
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	25	0,009433	-0,02404	0,025821	1,196801

Окончание таблицы 3

0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	26	0,008594	-0,02282	0,179954	1,210558
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	27	0,007866	-0,02173	0,362979	1,223445
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	28	0,00723	-0,02075	13,50734	1,23554
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	29	0,00667	-0,01987	0,344447	1,246911
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	30	0,006175	-0,01907	0,175002	1,257622
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	31	0,005734	-0,01834	0,019212	1,267726
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	32	0,00534	-0,01767	0,018456	1,277274
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	33	0,004986	-0,01705	0,017764	1,28631
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	34	0,004666	-0,01648	0,017128	1,294872
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	35	0,004377	-0,01595	0,016542	1,302998
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	36	0,004115	-0,01546	0,016	1,31072
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	37	0,003875	-0,01501	0,015498	1,318067
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	38	0,003656	-0,01458	0,01503	1,325065
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	39	0,003456	-0,01418	0,014594	1,331739
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	40	0,003271	-0,0138	0,014186	1,338111
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	41	0,003101	-0,01345	0,013804	1,344201
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	42	0,002944	-0,01312	0,013446	1,350027
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	43	0,002799	-0,01281	0,013108	1,355607
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	44	0,002664	-0,01251	0,012791	1,360954
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	45	0,002539	-0,01223	0,012491	1,366084
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	46	0,002423	-0,01196	0,012207	1,37101
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	47	0,002314	-0,01171	0,011938	1,375743
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	48	0,002212	-0,01147	0,011684	1,380295
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	49	0,002117	-0,01124	0,011442	1,384675
0,143	544,31	5443,1	0,007	0,11	272,16	50	0,002028	-0,01103	0,011212	1,388894

По результатам табл.3 построены графики амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазо-частотной характеристики (ФЧХ) цепи (рис 7,8).

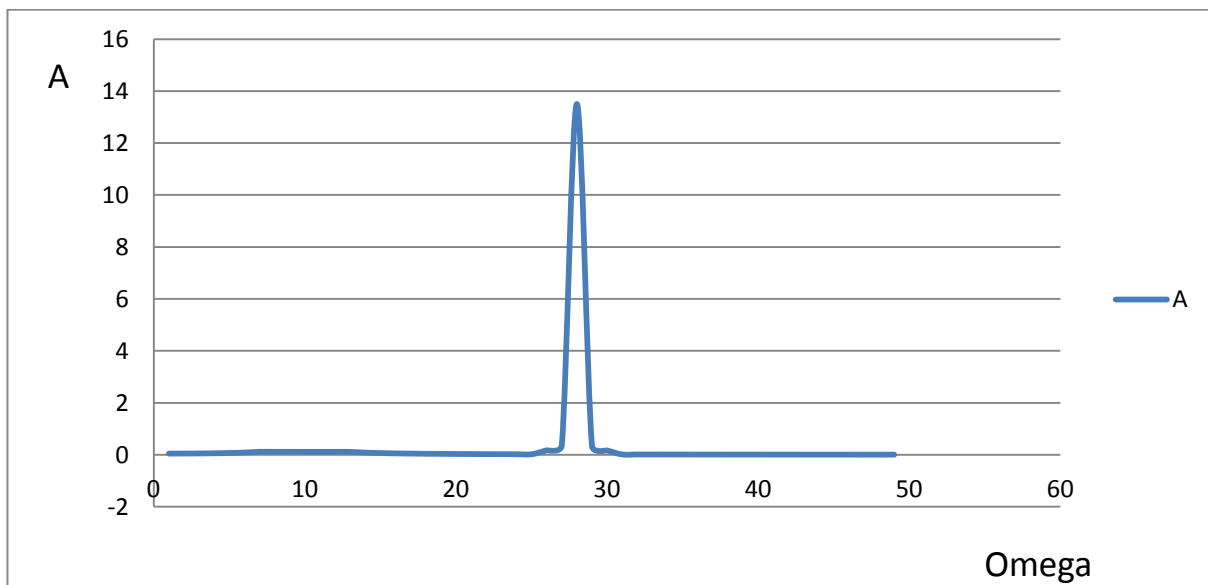


Рисунок 7 – Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) цепи

Как видно из графика (рис.7) имеется характерное увеличение амплитуды более 13 раз на частоте 25-30 рад/с.

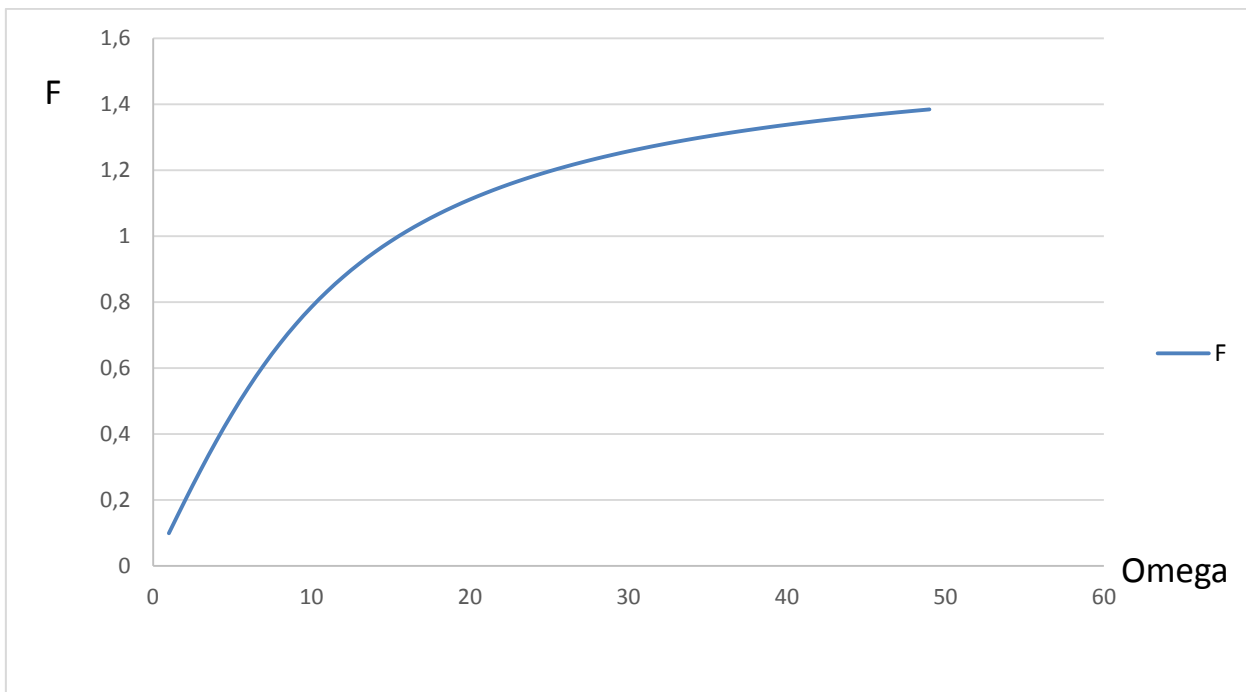


Рисунок 8 – Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) цепи

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

МД-02069964-13.04.01-07-18

Для построения амлитудно-частотной и фазо-частотной характеристик определяем параметры энергетической цепи.

Определение параметров энергетической цепи:

$$2) r_1 = 100, r_2 = 0,05, m^1 = 300, c = 4,187, \rho = 600, k_1 = 1,3$$

$$k_2 = 1, l = 2, q_0 = 0,27.$$

Таблица 4 – Исходные данные для расчета частотных характеристик

a ₁	a ₂	a ₃	b ₁	b ₂	b ₃
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3

Таблица 5 – Результаты расчета частотных характеристик

A1	A2	A3	B1	B2	B3	Omega	Re	Im	A	F
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	1	0,008752	-0,02271	0,024342	1,203005
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	2	0,001948	-0,01007	0,010257	1,379682
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	3	0,000857	-0,0066	0,006652	1,441637
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	4	0,000485	-0,00494	0,00496	1,472763
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	5	0,000315	-0,00396	0,003973	1,491333
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	6	0,000223	-0,00332	0,003327	1,50358
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	7	0,000168	-0,00287	0,002873	1,512208
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	8	0,000132	-0,00253	0,1204	1,518574
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	9	0,000108	-0,00228	0,1195	1,523435
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	10	9,04E-05	-0,00207	0,1189	1,527248
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	11	7,75E-05	-0,00191	0,118	1,530304
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	12	6,76E-05	-0,00178	0,1179	1,532797
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	13	6E-05	-0,00167	0,001669	1,534861
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	14	5,39E-05	-0,00158	0,001576	1,536593
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	15	4,9E-05	-0,0015	0,001498	1,538064
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	16	4,5E-05	-0,00143	0,001431	1,539326
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	17	4,17E-05	-0,00137	0,001373	1,54042
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	18	3,89E-05	-0,00132	0,001324	1,541376
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	19	3,66E-05	-0,00128	0,001281	1,54222
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	20	3,46E-05	-0,00124	0,001244	1,542971
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	21	3,29E-05	-0,00121	0,001211	1,543645
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	22	3,14E-05	-0,00118	0,001183	1,544253
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	23	3,01E-05	-0,00116	0,001159	1,544807
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	24	2,9E-05	-0,00114	0,001137	1,545314
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	25	2,8E-05	-0,00112	0,001119	1,545782
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	26	2,71E-05	-0,0011	0,179954	1,546216
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	27	2,63E-05	-0,00109	0,362979	1,546622
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	28	2,56E-05	-0,00108	0,7856453	1,547002
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	29	2,5E-05	-0,00107	0,344447	1,54736

Окончание таблицы 5

0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	30	2,44E-05	-0,00106	0,175002	1,547699
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	31	2,39E-05	-0,00105	0,001051	1,548022
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	32	2,35E-05	-0,00105	0,001046	1,548329
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	33	2,31E-05	-0,00104	0,001041	1,548624
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	34	2,27E-05	-0,00104	0,001038	1,548906
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	35	2,24E-05	-0,00103	0,001035	1,549178
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	36	2,21E-05	-0,00103	0,001034	1,549441
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	37	2,18E-05	-0,00103	0,001033	1,549695
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	38	2,15E-05	-0,00103	0,001033	1,54994
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	39	2,13E-05	-0,00103	0,001034	1,550178
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	40	2,11E-05	-0,00103	0,001035	1,55041
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	41	2,09E-05	-0,00104	0,001037	1,550635
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	42	2,07E-05	-0,00104	0,00104	1,550853
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	43	2,06E-05	-0,00104	0,001043	1,551067
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	44	2,04E-05	-0,00105	0,001046	1,551274
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	45	2,03E-05	-0,00105	13,50734	1,551477
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	46	2,02E-05	-0,00105	0,001055	1,551674
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	47	2,01E-05	-0,00106	0,001059	1,551867
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	48	1,99E-05	-0,00106	0,001065	1,552056
0,239	8491,236	3265,86	0,117	0,184	163,3	49	1,99E-05	-0,0010	0,00107	1,55224

По результатам таблицы 5 построены графики амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазо-частотной характеристики (ФЧХ) цепи (рис9,10).

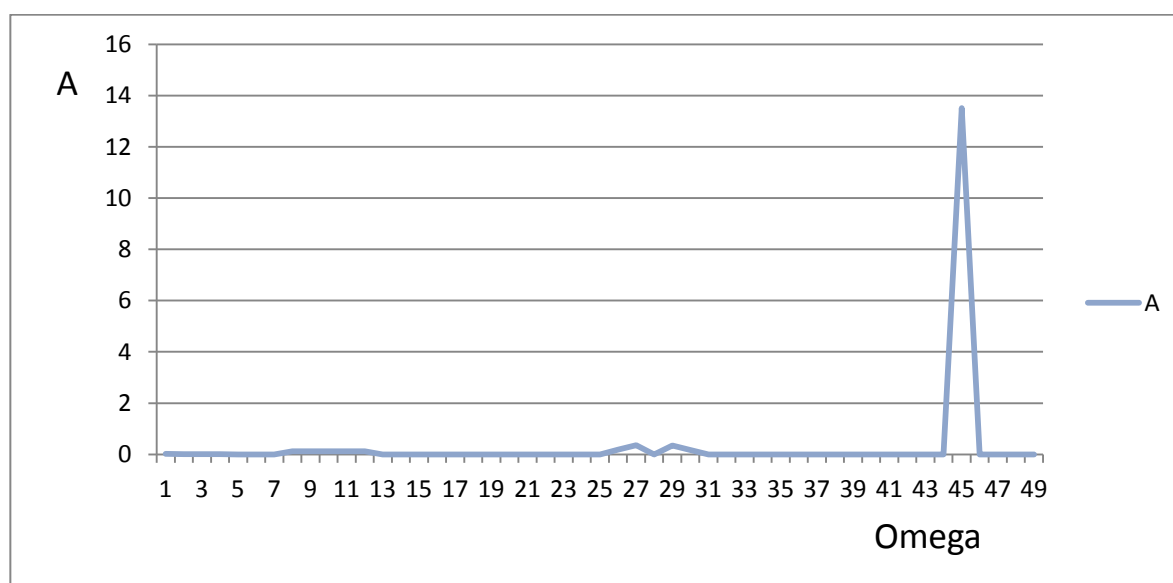


Рисунок 9 – Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) цепи

Как видно из графика (рис.9) имеется характерное увеличение амплитуды более 13 раз на частоте 43-47 рад/с.

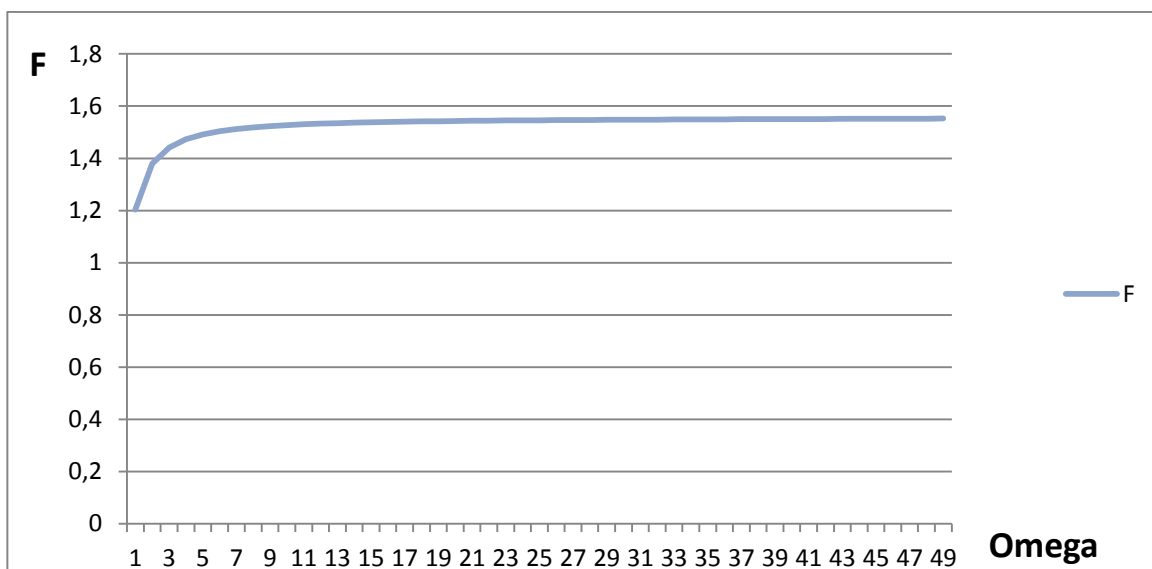


Рисунок 10 – Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) цепи

Для построения амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик определяем параметры энергетической цепи.

Определение параметров энергетической цепи:

$$3) r_1 = 100, r_2 = 0,05, m^1 = 700, c = 4,187, \rho = 800, k_1 = 1,3$$

$$k_2 = 1, l = 1, q_0 = 0,27.$$

Таблица 6 – Исходные данные для расчета частотных характеристик

a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724

Таблица 7 – Результаты расчета частотных характеристик

A1	A2	A3	B1	B2	B3	Ω	Re	Im	A	F
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	1	-0,05036	0,002481	0,050418	0,049225
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	2	-0,05074	0,005001	0,050991	0,098245
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	3	-0,0514	0,007604	0,051963	0,146858
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	4	-0,05236	0,010334	0,053367	0,194875

Окончание таблицы 7

0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	5	-0,05364	0,013246	0,055248	0,242121
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	6	-0,05529	0,016405	0,057673	0,288438
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	7	-0,05738	0,019892	0,060734	0,333689
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	8	-0,06001	0,023813	0,1204	0,37776
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	9	-0,0633	0,02831	0,1195	0,420557
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	10	-0,06744	0,033583	0,1189	0,462011
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	11	-0,07271	0,039918	0,118	0,502072
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	12	-0,07953	0,047751	0,1179	0,540709
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	13	-0,0886	0,057781	0,105773	0,577908
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	14	-0,10107	0,071195	0,123629	0,613671
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	15	-0,11915	0,090207	0,149448	0,648011
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	16	-0,14745	0,119467	0,189771	0,680953
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	17	-0,19758	0,170695	0,261101	0,71253
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	18	-0,30969	0,284359	0,420439	0,742779
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	19	-0,77885	0,75787	1,086728	0,771746
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	20	1,28985	-1,3267	1,850365	0,799476
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	21	0,33897	-0,36769	0,500101	0,82602
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	22	0,19076	-0,21778	0,289517	0,851427
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	23	0,13067	-0,15671	0,204042	0,875748
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	24	0,09819	-0,1235	0,157778	0,899033
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	25	0,0779	-0,10259	0,128812	0,921332
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	26	0,06404	-0,08819	0,179954	0,942692
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	27	0,05400	-0,07766	0,362979	0,963161
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	28	0,04640	-0,06961	13,50734	0,982782
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	29	0,04047	-0,06325	0,344447	1,001599
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	30	0,03571	-0,0581	0,175002	1,019652
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	31	0,03181	-0,05383	0,062529	1,03698
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	32	0,02857	-0,05024	0,057795	1,053621
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	33	0,02584	-0,04717	0,053782	1,069609
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	34	0,023505	-0,04451	0,050338	1,084977
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	35	0,021489	-0,0422	0,047353	1,099756
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	36	0,019735	-0,04015	0,04474	1,113976
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	37	0,018195	-0,03834	0,042436	1,127664
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	38	0,016835	-0,03671	0,04039	1,140847
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	39	0,015627	-0,03525	0,038561	1,153548
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	40	0,014546	-0,03393	0,036916	1,165791
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	41	0,013575	-0,03273	0,035431	1,177597
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	42	0,012699	-0,03163	0,034083	1,188987
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	43	0,011906	-0,03062	0,032855	1,199981
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	44	0,011184	-0,02969	0,031731	1,210595
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	45	0,010525	-0,02884	0,030699	1,220847
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	46	0,009922	-0,02805	0,02975	1,230753
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	47	0,009369	-0,02731	0,028872	1,240328
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	48	0,008859	-0,02662	0,02806	1,249586
0,209	217,725	4354,48	0,0105	0,162	217,724	49	0,008388	-0,02598	0,027305	1,258541

По результатам таблицы 7 построены графики амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазо-частотной характеристики (ФЧХ) цепи (рис. 11,12).

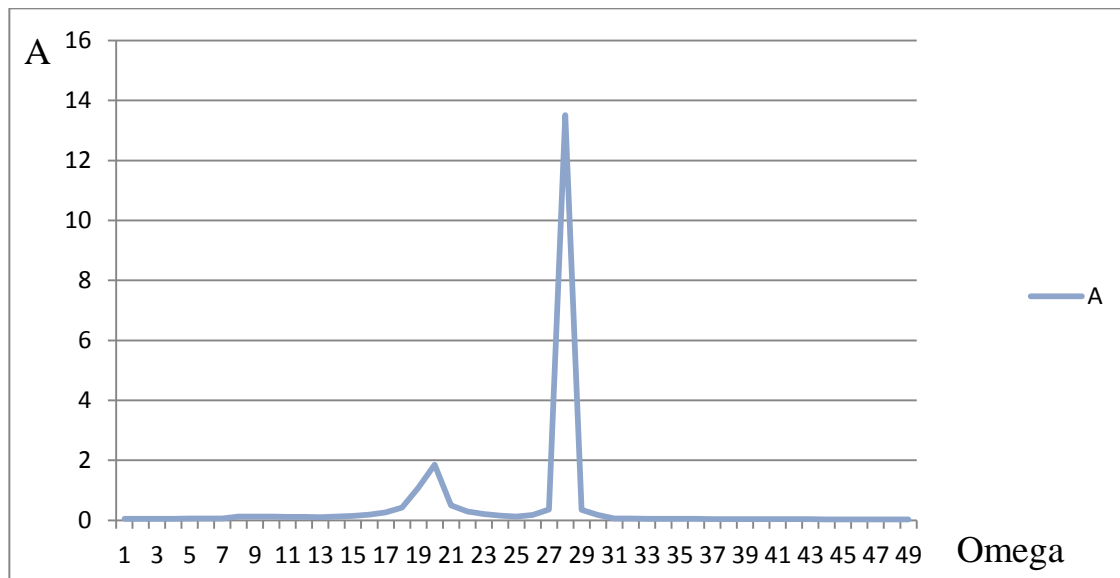


Рисунок 11 – Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) цепи

Как видно из графика (рис.11) имеется характерное увеличение амплитуды более 13 раз на частоте 28-30 рад/с и незначительное увеличение амплитуды в 2 раза на частоте 17-23 рад/с.

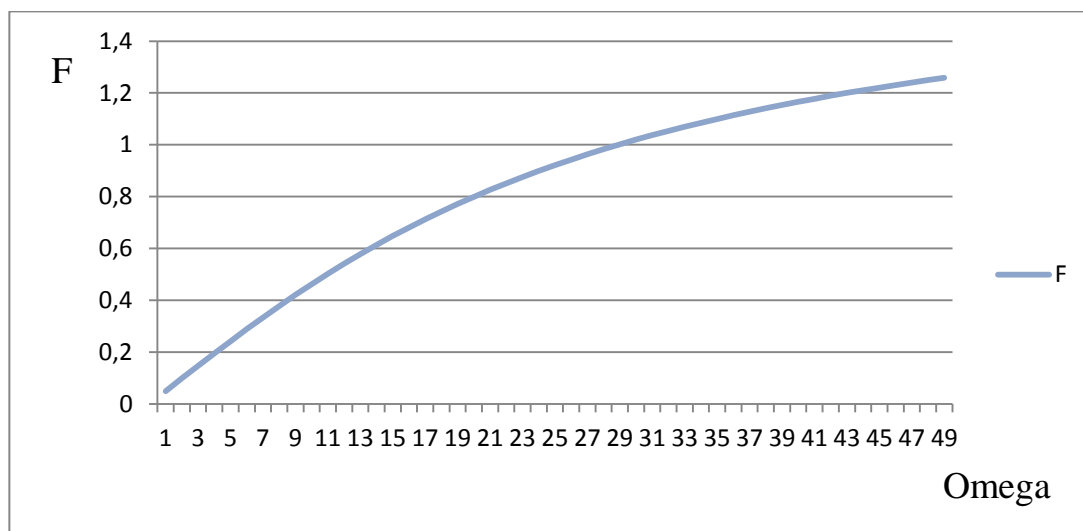


Рисунок 12 – Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) цепи

По результатам таблиц 3, 5, 7 построены графики амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазо-частотной характеристики (ФЧХ) цепи (рис.13,14).

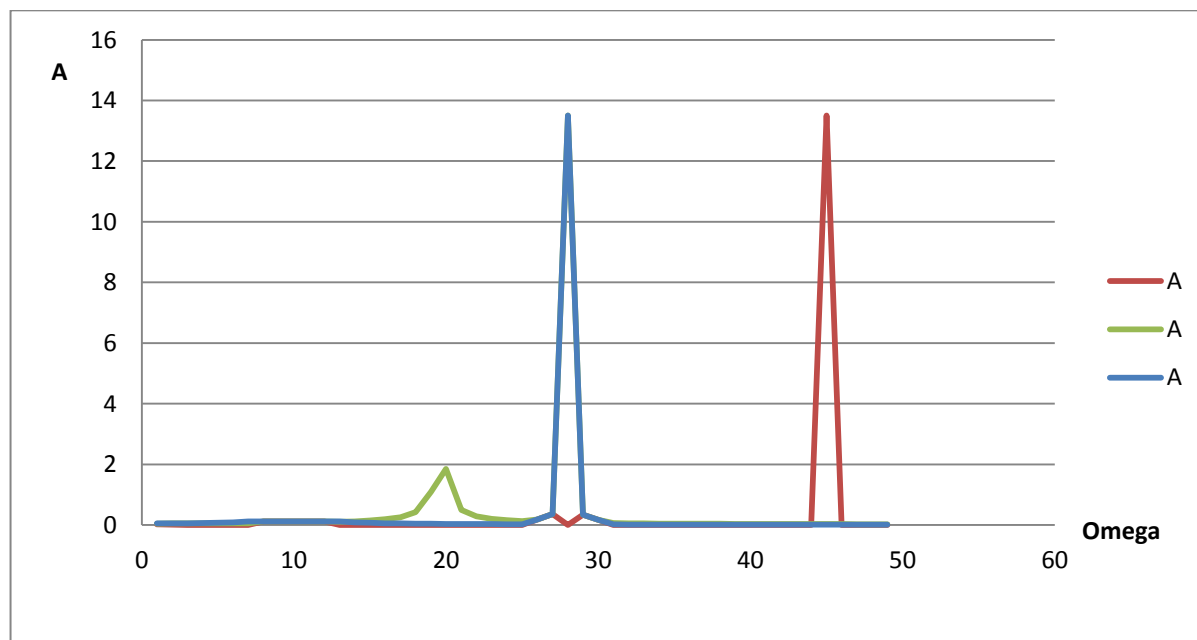


Рисунок 13– Амплитудно- частотная характеристика (АЧХ) цепи

Как видно из результатов моделирования (рис.13) оптимальная частота колебаний составляет 25-30 рад/с при выбранных параметрах: $r_1 = 100$, $r_2 = 0,05$, $m^1 = 300$, $c = 4,187$, $\rho = 1000$, $k_1 = 1,3$, $k_2 = 1$, $l = 2$, $q_0 = 0,27$.

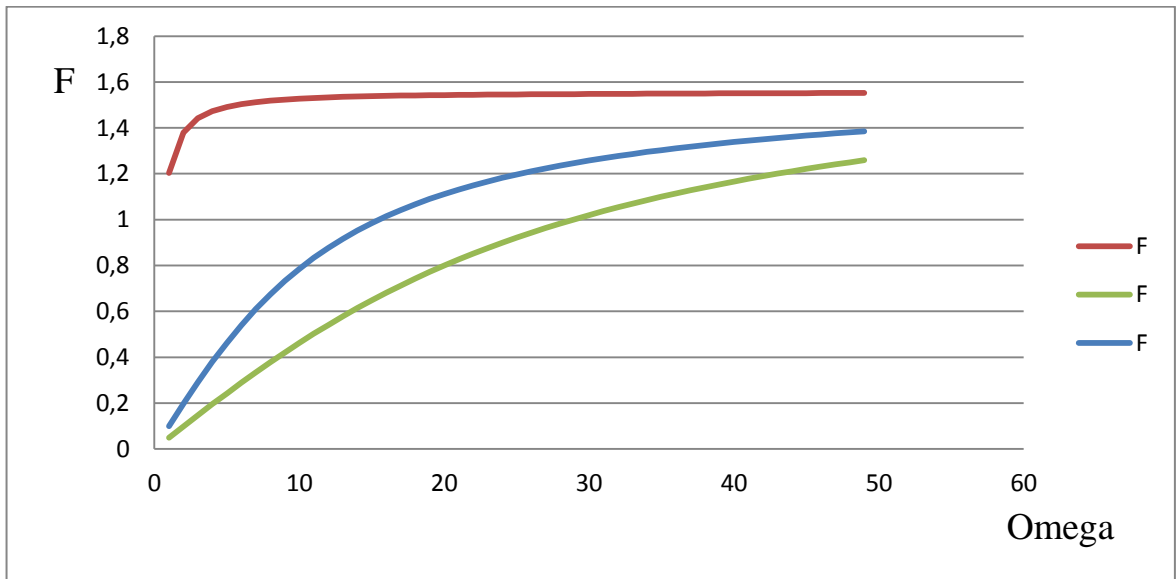
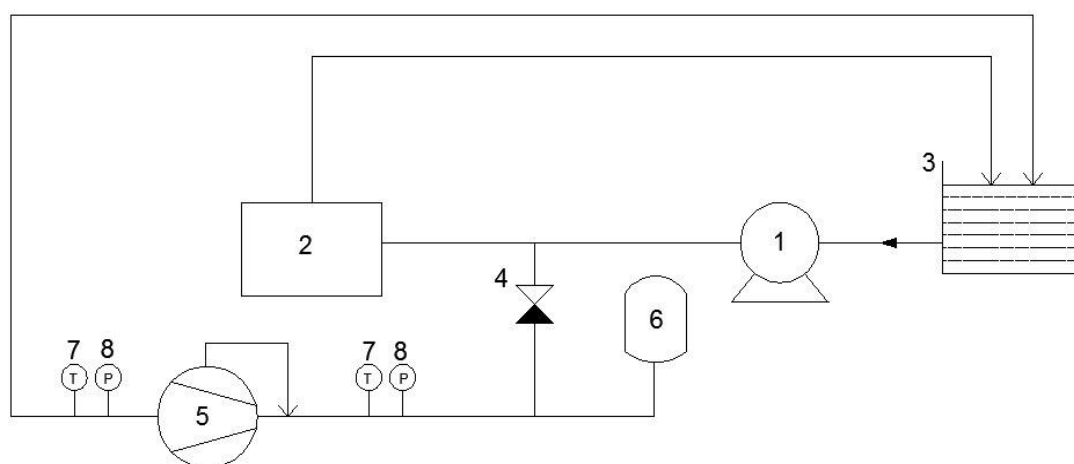


Рисунок 14 – Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) цепи

3 Экспериментальная установка

3.1 Описание экспериментальной установки

На рисунке 15 представлена схема лабораторной установки с импульсной циркуляцией теплоносителя.



1 – циркуляционный насос; 2 – ударный узел; 3 – бак аккумулятора; 4 – обратный клапан; 5 – кавитатор; 6 – гидроаккумулятор; 7 – датчики температуры; 8 – датчики давления

Рисунок 15 – Схема лабораторной установки с импульсной циркуляцией теплоносителя

Циркуляционный насос 1 направляет жидкость из бака аккумулятора 3 по двум контурам.

1 контур: через ударный узел 2 в бак аккумулятора 3.

2 контур: через обратный клапан 4, где происходит нагрев жидкости, кавитатор 5 в бак аккумулятора 3.

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Генерируемые в ударном узле 2 гидравлические удары повышают давление во втором контуре, тем самым существенно увеличивая эффект от работы кавитатора. Гидроаккумулятор 6 сглаживает давление, создаваемое ударным узлом 2. Датчики температуры и давления, 7 и 8 соответственно, регистрируют параметры работы системы.

Для циркуляции воды в лабораторной установке используется циркуляционный насос WILOIPL 32/175 [21]. Насос WILO-IPL 32/175 – циркуляционный, одноступенчатый, низконапорный, центробежный насос с сухим ротором. Насос Wilo применяется для перекачивания горячей или холодной воды, не имеющей в своем составе абразивных частиц. Наиболее часто используется в системах водоснабжения, охлаждения, а также в отопительных и кондиционирующих системах, а также в установках бытового и промышленного назначения. На рисунке 16 показан циркуляционный насос WILOIPL 32/175. В таблице 8 приведены технические характеристики циркуляционного насоса WILOIPL 32/175 [22].



Рисунок 16 – Циркуляционный насос WILOIPL 32/175

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

Таблица 8 – Технические характеристики циркуляционного насоса WILO IPL 32/175

Характеристики	Значения
Производитель	WILO
Тип	IPL 32/175
Вид	Насос циркуляционный
Производительность, м ³ /ч	21
Мощность электродвигателя, кВт	4
Напор, м	33

Для создания гидравлических ударов в системе использовался ударный узел с электроприводом [23]. Ударный узел с электроприводом показан на рисунке 17.



Рисунок 17 – Ударный узел с электроприводом

Для забора воды использовался металлический бак аккумулятор следующих геометрических размеров: высота – 0,8 м, ширина – 0,5 м, длина – 0,5 м. В бак аккумулятор также происходит сброс нагретой воды.

Для предотвращения опрокидывания потока жидкости используется обратный клапан[24].

Для нагрева жидкости в лабораторной установки используется струйныйкавитатор.Схема струйногокавитатора представлена на рисунке 18.

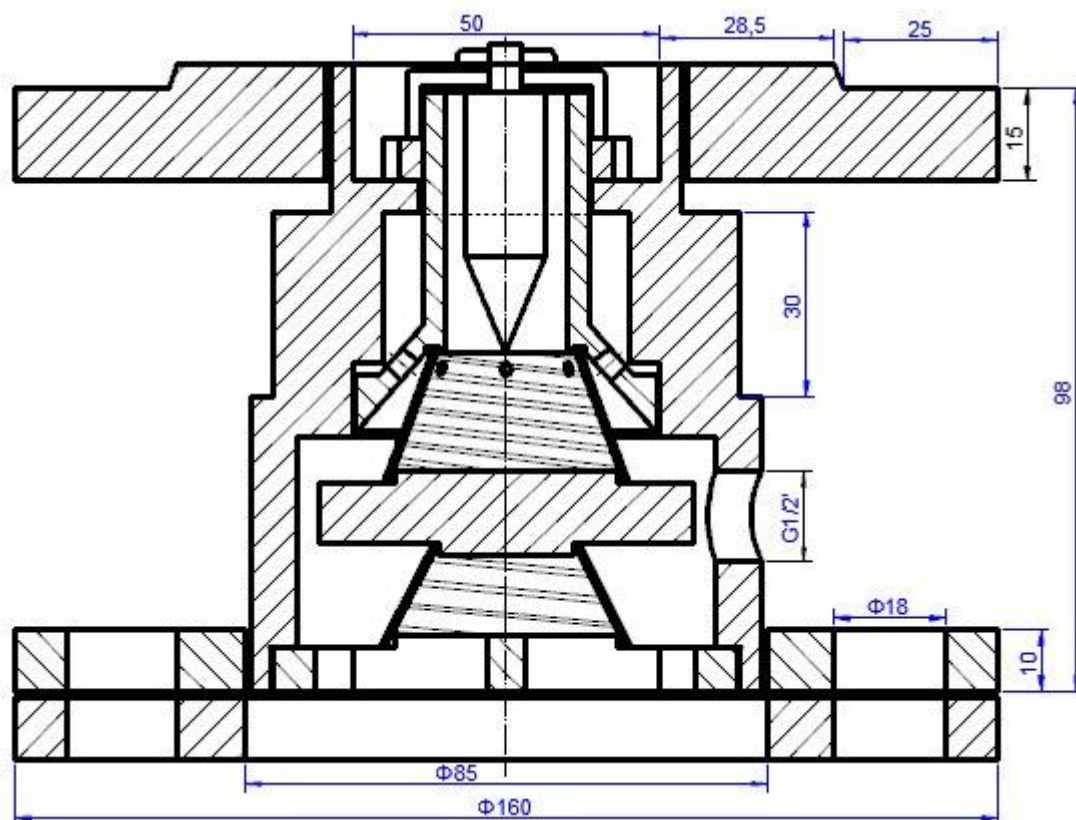


Рисунок 18 – Схема струйного кавитатора

Измерение температуры на подаче в струйный кавитатор и на выходе из нее производилось с помощью термопреобразователей сопротивления ОВЕН ДТС 035-50М.В3.80 [25,26], представленных на рисунке 19. Технические характеристики термопреобразователя сопротивления приведены в таблице 9.

Принцип действия термометров сопротивления основан на свойстве проводника изменять электрическое сопротивление пропорционально изменению температуры окружающей среды. Основными преимуществами

термометров сопротивления являются высокая точность измерений, высокая стабильность, близость характеристики к линейной зависимости.



Рисунок 19 – Термопреобразователь сопротивления ОВЕН ДТС 035-50М.В3.80

Таблица 9 – Технические характеристики термопреобразователя сопротивления ОВЕН ДТС 035-50М.В3.80

Характеристики	Значения
Номинальная статическая характеристика (НСХ)	50М
Модель	035
Длина монтажной части	Длина монтажной части
Класс допуска	В
Условное давление	10МПа
Показатель тепловой инерции	Не более 10...30с
Сопротивление изоляции	Не менее 100 МОм
Количество чувствительных элементов	1 шт.
Схема внутренних соединений проводников	Трехпроводная
Исполнение сенсора относительно корпуса	Изолированный
Исполнение коммутационной головки	Пластмассовая
Материал защитной арматуры	Сталь 12Х18Н10Т
Степень защиты	IP54

Измерение давления производилось непосредственно рядом со струйным кавитатором и ударным узлом. Для измерения был использован датчик ОВЕН ПД100 модель 111 [27,28], представленный на рисунке 20. Технические характеристики представлены в таблице 10. Данный датчик представляет собой преобразователь давления с измерительной мембраной из нержавеющей стали AISI 316L, сенсором на основе технологии КНК и кабельным вводом стандарта EN175301-803 (DIN43650 A).



Рисунок 20 – Преобразователь давления ПД100

Таблица 10 – Технические характеристики преобразователя давления ПД100

Характеристики	Значения
Верхний предел измерений, МПа	0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40
Выходной сигнал, мА	4 — 20
Предел допускаемой основной погрешности, %	$\pm 0,5$; $\pm 1,0$
Напряжение питания, В	24^{+6}_{-15}
Нагрузочное сопротивление, Ом	от 0,1 до 500
Мощность, В•А, не более	1,0

Окончание таблицы 10

1	2
Климатическое исполнение:	УХЛ 3.1 — но для работы при температуре от минус 10 °С до плюс 80°С и относительной влажности 95% при 35°С и более низких температурах без конденсации влаги Температура измеряемой среды от минус 20°С до плюс 150°С (если температура превышает плюс 80°С, то подключать преобразователи необходимо с применением охлаждающего радиатора или импульсной трубки)
Степень защиты	IP65
Межповерочный интервал	2 года
Гарантийный срок эксплуатации	1,5 года
Масса, кг, не более	0,2

Для сглаживания импульсов, создаваемых ударным узлом, в лабораторной установки используется гидроаккумулятор джилекс, изображенный на рисунке 21. Технические характеристики гидроаккумулятора представлены в таблице 11.



Рисунок 21 – Гидроаккумулятор джилекс Г14

Таблица 11– Технические характеристики гидроаккумулятора Г14

Характеристики	Значения
Присоединительный размер, дюйм	3/4
Вес, кг	3.3
Объем гидроаккумулятора, л.	14
Компоновка	горизонтальный
Материал мембраны	EPDM

3.2 Автоматизированная система сбора данных

Для регистрации переходных процессов был использован программный комплекс LABVIEW и специальный модуль стенда «Аналоговый ввод – вывод» фирмы ОВЕН модель МВ-110.

Для корректной регистрации переходных процессов необходимо правильно собрать схему. Для этого необходимо подать сигнал с выхода датчиков на модуль «Аналоговый ввод – вывод» (вход АЦП), который подключен к ЭВМ [29,30]. Регистрация переходных процессов осуществлялась 2 раза в секунду.

Программный комплекс был реализован на базе Lenovo b580 со следующими характеристиками:

- тип процессора Core i3-3110M;
- частота процессора 2400 МГц;
- количество ядер процессора 2 шт.;
- размер оперативной памяти 2 Гб;
- тип памяти DDR3-1333.

3.3 Составление теплового баланса для выбранной схемы контура с кавитатором

Тепловой баланс системы с теплогидравлическим преобразователем[31,32]:

$$N = Q_k + \Sigma D, \quad (15)$$

где N – мощность затрачиваемая насосом, $N= 500$ Вт;

Q_k – тепловая энергия полученная на кавитаторе, Дж;

ΣD – сумма потерь на кавитаторе, Гкал.

Тепловая энергия, полученная на кавитаторе, рассчитывается по формуле:

$$Q_k = G \cdot (T_2 - T_1) \cdot c, \quad (16)$$

где G – расход через кавитатор, м³/ч;

T_2 – температура на входе в кавитатор, °С;

T_1 – температура на выходе из кавитатора, °С;

c – теплоемкость теплоносителя, $c = 4,19$.

КПД кавитатора находим по формуле:

$$\eta = \frac{Q_k}{N} \quad (17)$$

Все расчеты были сделаны в программе MicrosoftExcel и приведены в таблице 12.

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		38

Таблица 12 – Результаты вычислений

Номер эксперимента	$G, \text{ м}^3/\text{ч}$	$\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$	$Q_k, \text{ Дж}$	$N, \text{ Вт}$	$\Sigma D, \text{ Гкал}$	$\eta, \%$
1	0,1	0,16	0,067	543	542,933	0,0134
2	0,1	0	0	528	528	0
3	0,1	0,72	0,3	537	536,7	0,06
4	0,1	0,13	0,054	540	539,946	0,0108
5	0,5	0,41	0,86	535	534,14	0,172
6	0,5	0,33	0,691	541	540,309	0,1382
7	0,5	1,057	2,21	539	536,79	0,45
8	0,5	0,37	0,775	529	528,225	0,155

4 Обработка результатов экспериментальных исследований

4.1 Методика и программа проведения эксперимента

При планировании экспериментов необходимо соблюдать следующую последовательность действий [33]:

- определить количество опытов при снятии переходных функций $\omega(t)$, амплитудно-частотных $A(\Omega)$, фазо-частотных $\varphi(\Omega)$ и нагрузочных статических характеристик ;

- определить время проведения эксперимента по снятию 1-ой реализации переходной или частотной характеристики, а также общее время проведения опыта;

- оценить влияние основных факторов на динамическую скоростную характеристику;

При проведении эксперимента по оценке методики расчета характеристик цифрового измерительного средства было установлено, что основное влияние на точность измерения оказывают частота дискретизации и разрядность платы сбора данных. Поэтому записи файлов данных производились на нескольких частотах, и производилась оценка вызванных отклонений.

Точность измерения определяется степенью соответствия результатов измерения действительному значению измеряемой величины. Разницу этих двух значений называют абсолютной погрешностью измерения.

Для решения поставленной задачи проведем эксперимент с использованием экспериментальной установки

Параметром оптимизации является значение температуры на выходе из кавитатора в импульсном режиме. Сравниваются значения, полученные при разной частоте гидравлического удара.

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Из анализа литературных источников выделены следующие факторы, имеющие непосредственное влияние на процесс:

- угол конуса насадки, град.;
- расход воды через кавитатор, G , м³/ч;
- частота гидравлического удара, ν .

Данные факторы представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Факторы эксперимента

Наименование и обозначение факторов	Уровни варьирования			Интервалы варьирования
	-1	0	+1	
Частота гидравлических ударов	10	25	40	30
Угол конуса насадки	30	45	60	30
Расход через кавитатор	0,1	0,3	0,5	0,4

Изменение угла конуса контролируется путем смены различных насадок в кавитаторе. Изменение расхода контролируется с помощью шарового крана. Изменение частоты гидравлических ударов обеспечивается метрономом.

По каждому эксперименту бралось три измеренных значений факторов. Эксперимент выполнялся в три этапа при разных значениях частоты гидравлических ударов, расхода через кавитатор и диаметра сопла.

Эксперимент проводился при постоянной температуре наружного воздуха. Для уменьшения влияния случайных ошибок работа выполнялась в одной время суток и одним исследователем.

Измерения выполнены с помощью однотипных датчиков температуры, давления фирмы ОВЕН.

4.2 Обработка экспериментальных данных

Результаты эксперимента №1 показаны в таблице 14.

Таблица 14 – Результаты эксперимента № 1

Время	Значение температуры после кавитатора, °C	Значение температуры до кавитатора, °C	Значение давления после кавитатора, кг/см ²	Значение давления до кавитатора, кг/см ²	Δt до и после кавитатора, °C	ΔP до и после кавитатора, кг/см ²
15:0:50	0	0	0	0	0	0
15:0:55	22,278526	22,524902	0,02041	0,089038	-0,24638	-0,06863
15:1:0	22,237457	22,535164	0,021053	0,098179	-0,29771	-0,07713
15:1:5	22,28878	22,524902	0,021124	0,103392	-0,23612	-0,08227
15:1:10	22,196396	22,514641	0,019553	0,098965	-0,31825	-0,07941
15:1:15	22,196396	22,514641	0,020482	0,098251	-0,31825	-0,07777
15:1:20	22,28878	22,442772	0,019625	0,113819	-0,15399	-0,09419
15:1:25	22,28878	22,535164	0,022553	0,133743	-0,24638	-0,11119
15:1:30	22,28878	22,524902	0,02241	0,19623	-0,23612	-0,17382
15:1:35	22,28878	22,453041	0,024124	0,200729	-0,16426	-0,17661
15:1:40	22,28878	22,453041	0,024624	0,262501	-0,16426	-0,23788
15:1:45	22,206665	22,453041	0,022981	0,279069	-0,24638	-0,25609
15:1:50	22,28878	22,370911	0,027552	0,316133	-0,08213	-0,28858
15:1:55	22,28878	22,370911	0,023124	0,343413	-0,08213	-0,32029
15:2:0	22,237457	22,28878	0,026337	0,334557	-0,05132	-0,30822
15:2:5	22,309319	22,278526	0,028766	0,330344	0,030793	-0,30158
15:2:10	22,196396	22,278526	0,026337	0,35391	-0,08213	-0,32757
15:2:15	22,278526	22,196396	0,023267	0,339485	0,08213	-0,31622
15:2:20	22,206665	22,206665	0,031765	0,343127	0	-0,31136
15:2:25	22,206665	22,114281	0,029837	0,386189	0,092384	-0,35635
15:2:30	22,196396	22,12455	0,025338	0,360338	0,071846	-0,335
15:2:35	22,216934	22,114281	0,029551	0,365622	0,102653	-0,33607
15:2:40	22,196396	22,134804	0,032051	0,355053	0,061592	-0,323
15:2:45	22,196396	22,042412	0,026695	0,377977	0,153984	-0,35128
15:2:50	22,114281	22,042412	0,02648	0,370978	0,071869	-0,3445
15:2:55	22,114281	21,960281	0,032265	0,374192	0,154	-0,34193
15:3:0	22,114281	21,960281	0,029123	0,374192	0,154	-0,34507
15:3:5	22,12455	21,878166	0,026695	0,361623	0,246384	-0,33493
15:3:10	22,114281	21,878166	0,028766	0,361123	0,236115	-0,33236
15:3:15	22,114281	21,878166	0,032908	0,362766	0,236115	-0,32986
15:3:20	22,03215	21,796036	0,027266	0,381404	0,236114	-0,35414
15:3:25	22,12455	21,796036	0,024195	0,364551	0,328514	-0,34036
15:3:30	22,042412	21,703651	0,024338	0,39333	0,338761	-0,36899
15:3:35	22,042412	21,713905	0,031693	0,367122	0,328507	-0,33543
15:3:40	22,03215	21,713905	0,028337	0,375834	0,318245	-0,3475
15:3:45	22,03215	21,63179	0,023909	0,37055	0,40036	-0,34664

Продолжение таблицы 14

15:3:50	22,03215	21,611252	0,031765	0,379548	0,420898	-0,34778
15:3:55	22,042412	21,539398	0,031194	0,430108	0,503014	-0,39891
15:4:0	21,950012	21,539398	0,029194	0,381404	0,410614	-0,35221
15:4:5	21,960281	21,457268	0,025623	0,39683	0,503013	-0,37121
15:4:10	21,960281	21,375137	0,032765	0,384618	0,585144	-0,35185
15:4:15	21,960281	21,375137	0,028837	0,390902	0,585144	-0,36207
15:4:20	21,960281	21,282753	0,023909	0,385618	0,677528	-0,36171
15:4:25	21,960281	21,293022	0,026337	0,394902	0,667259	-0,36857
15:4:30	21,960281	21,293022	0,032336	0,369978	0,667259	-0,33764
15:4:35	21,878166	21,293022	0,025838	0,285782	0,585144	-0,25994
15:4:40	21,878166	21,210892	0,025409	0,302564	0,667274	-0,27716
15:4:45	21,878166	21,221161	0,02598	0,377691	0,657005	-0,35171
15:4:50	21,878166	21,200623	0,02698	0,339556	0,677543	-0,31258
15:4:55	21,878166	21,13903	0,027337	0,368407	0,739136	-0,34107
15:5:0	21,796036	21,128777	0,027052	0,347626	0,667259	-0,32057
15:5:5	21,796036	21,13903	0,025052	0,331058	0,657006	-0,30601
15:5:10	21,785767	21,13903	0,025338	0,354982	0,646737	-0,32964
15:5:15	21,785767	21,13903	0,031836	0,343698	0,646737	-0,31186
15:5:20	21,724174	21,13903	0,029408	0,404328	0,585144	-0,37492
15:5:25	21,724174	21,056908	0,027552	0,352839	0,667266	-0,32529
15:5:30	21,713905	21,128777	0,023267	0,341556	0,585128	-0,31829
15:5:35	21,703651	21,067177	0,025695	0,354125	0,636474	-0,32843
15:5:40	21,703651	21,046646	0,033693	0,346269	0,657005	-0,31258
15:5:45	21,63179	21,056908	0,029265	0,391759	0,574882	-0,36249
15:5:50	21,621521	21,056908	0,029408	0,343341	0,564613	-0,31393
15:5:55	21,63179	21,046646	0,026195	0,3367	0,585144	-0,31051
15:6:0	21,621521	21,046646	0,027909	0,349911	0,574875	-0,322
15:6:5	21,621521	20,964523	0,020339	0,338271	0,656998	-0,31793
15:6:10	21,63179	21,046646	0,026123	0,349626	0,585144	-0,3235
15:6:15	21,63179	20,974792	0,030622	0,339556	0,656998	-0,30893
15:6:20	21,63179	20,974792	0,030265	0,333272	0,656998	-0,30301
15:6:25	21,63179	21,036377	0,027909	0,346769	0,595413	-0,31886
15:6:30	21,539398	20,974792	0,029551	0,338128	0,564606	-0,30858
15:6:35	21,63179	21,046646	0,027694	0,378548	0,585144	-0,35085
15:6:40	21,549667	21,046646	0,020339	0,336628	0,503021	-0,31629
15:6:45	21,549667	21,0877	0,024624	0,331629	0,461967	-0,30701
15:6:50	21,539398	21,056908	0,033622	0,39383	0,48249	-0,36021
15:6:55	21,477791	21,015854	0,024481	0,472242	0,461937	-0,44776
15:7:0	21,539398	21,077446	0,027909	0,398615	0,461952	-0,37071
15:7:5	21,539398	21,056908	0,030765	0,370121	0,48249	-0,33936
15:7:10	21,549667	21,046646	0,027052	0,355767	0,503021	-0,32872
15:7:15	21,539398	21,056908	0,026052	0,379262	0,48249	-0,35321
15:7:20	21,549667	21,056908	0,028266	0,374263	0,492759	-0,346
15:7:25	21,63179	21,128777	0,027337	0,360052	0,503013	-0,33272
15:7:30	21,539398	21,046646	0,025695	0,412184	0,492752	-0,38649
15:7:35	21,539398	21,046646	0,026766	0,431465	0,492752	-0,4047
15:7:40	21,457268	21,046646	0,031551	0,435607	0,410622	-0,40406
15:7:45	21,457268	21,046646	0,031551	0,43675	0,410622	-0,4052
15:7:50	21,457268	21,128777	0,030622	0,451318	0,328491	-0,4207

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

Окончание таблицы 14

15:7:55	21,467537	21,13903	0,026909	0,351982	0,328507	-0,32507
15:8:0	21,375137	21,056908	0,026909	0,340342	0,318229	-0,31343
15:8:5	21,385406	21,13903	0,026837	0,339056	0,246376	-0,31222
15:8:10	21,467537	21,128777	0,026266	0,338485	0,33876	-0,31222
15:8:15	21,385406	21,13903	0,026409	0,338199	0,246376	-0,31179
15:8:20	21,385406	21,128777	0,02648	0,336914	0,256629	-0,31043
15:8:25	21,385406	21,128777	0,026623	0,336843	0,256629	-0,31022
15:8:30	21,385406	21,13903	0,026909	0,337128	0,246376	-0,31022
15:8:35	21,385406	21,128777	0,026766	0,336985	0,256629	-0,31022
15:8:40	21,385406	21,128777	0,02648	0,336985	0,256629	-0,31051
15:8:45	21,303291	21,13903	0,026409	0,337271	0,164261	-0,31086
15:8:50	21,303291	21,13903	0,02698	0,337914	0,164261	-0,31093
15:8:55	21,303291	21,13903	0,026337	0,334986	0,164261	-0,30865
15:9:0	21,303291	21,128777	0,024266	0,261287	0,174514	-0,23702
15:9:5	21,364883	21,128777	0,023124	0,189588	0,236106	-0,16646
15:9:10	21,303291	21,128777	0,021981	0,149383	0,174514	-0,1274
15:9:13	21,303291	21,13903	0,022053	0,149383	0,164261	-0,12733

По результатам таблицы 14 построены графики изменения температуры и давления от времени до и после кавитатора (рис. 22,23).

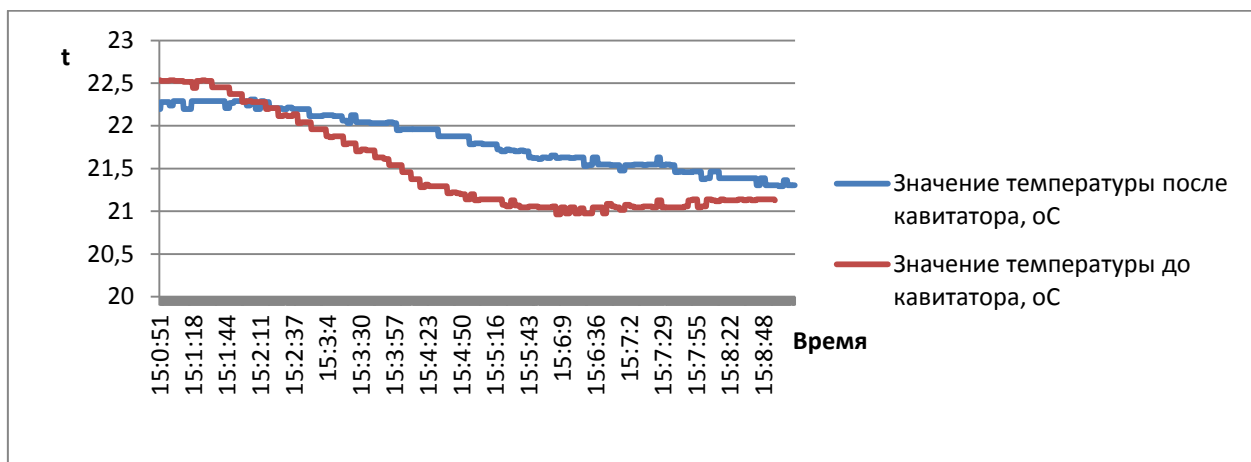


Рисунок 22 – График изменения во времени температуры до и после кавитатора

График, изображенный на рисунке 22, позволяет отслеживать динамику изменения температуры до и после кавитатора с течением времени. Из графика видно, что изначально температура воды до и после кавитатора

была 22,5 и 22,3 °С соответственно. С течением времени видно, что температура после кавитатора стала выше, чем до кавитатора. Это свидетельствует о появлении процесса кавитации.

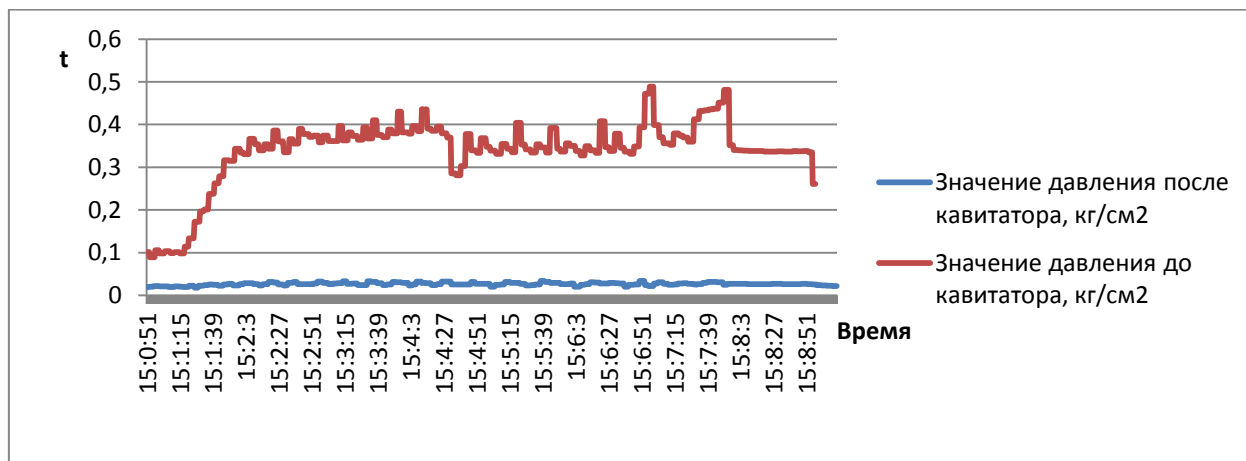


Рисунок 23 – График изменения во времени давления до и после кавитатора

График, изображенный на рисунке 23, позволяет отслеживать динамику изменения давления до и после кавитатора с течением времени. Из графика видно, что изначально давление до кавитатора и после находится на одном уровне. Скачки давления на графике до кавитатора свидетельствуют о включении ударного узла в работу и появлении гидравлических ударов в системе. Работа гидроаккумулятора сохраняет давление после кавитатора неизменным.

Результаты эксперимента №2 приведены в таблице 15.

Таблица 15– Результаты эксперимента №2

Время	Значение температуры после кавитатора, °С	Значение температуры до кавитатора, °С	Значение давления после кавитатора, кг/см ²	Значение давления до кавитатора, кг/см ²	Δt до и после кавитатора, °С	ΔP до и после кавитатора, кг/см ²
10:23:15	0	0	0	0	0	0
10:23:20	22,750748	23,048454	0,020125	0,146455	-0,297706	-0,12633

Продолжение таблицы 15

10:23:25	22,740479	23,048454	0,008556	0,327559	-0,307975	-0,319003
10:23:30	22,761017	23,151108	0,021553	0,693267	-0,390091	-0,671714
10:23:35	22,750748	23,140839	0,02041	0,667843	-0,390091	-0,647433
10:23:40	22,750748	23,130569	0,023552	0,668343	-0,379821	-0,644791
10:23:45	22,761017	23,140839	0,019196	0,641063	-0,379822	-0,621867
10:23:50	22,832863	23,130569	0,011841	0,655132	-0,297706	-0,643291
10:23:55	22,822601	23,222961	0,013554	0,629566	-0,40036	-0,616012
10:24:0	22,925255	23,202438	0,03355	0,576363	-0,277183	-0,542813
10:24:5	22,915001	23,222961	-0,000728	0,680912	-0,30796	-0,68164
10:24:10	22,997131	23,294823	0,000129	0,510877	-0,297692	-0,510748
10:24:15	22,986862	23,294823	0,033265	0,495166	-0,307961	-0,461901
10:24:20	22,986862	23,294823	0,008556	0,677127	-0,307961	-0,668571
10:24:25	23,099785	23,315353	0,018196	0,636136	-0,215568	-0,61794
10:24:30	23,068977	23,387222	0,015197	0,626566	-0,318245	-0,611369
10:24:35	23,171631	23,387222	0,006699	0,599144	-0,215591	-0,592445
10:24:40	23,171631	23,469337	0,039192	0,653561	-0,297706	-0,614369
10:24:45	23,161362	23,479607	0,00727	0,489453	-0,318245	-0,482183
10:24:50	23,243492	23,459068	0,011698	0,472814	-0,215576	-0,461116
10:24:55	23,253761	23,469337	0,017268	0,668343	-0,215576	-0,651075
10:25:0	23,335892	23,551468	0,015483	0,591502	-0,215576	-0,576019
10:25:5	23,325623	23,551468	0,010269	0,652989	-0,225845	-0,64272
10:25:10	23,335892	23,551468	0,038406	0,496309	-0,215576	-0,457903
10:25:15	23,325623	23,551468	0,018982	0,586789	-0,225845	-0,567807
10:25:20	23,325623	23,643852	0,022338	0,59186	-0,318229	-0,569522
10:25:25	23,397476	23,633583	0,038978	0,564722	-0,236107	-0,525744
10:25:30	23,407745	23,623329	0,014197	0,482669	-0,215584	-0,468472
10:25:35	23,489876	23,633583	0,01434	0,62371	-0,143707	-0,60937
10:25:40	23,489876	23,633583	-0,000228	0,40847	-0,143707	-0,408698
10:25:45	23,489876	23,643852	0,033836	0,385618	-0,153976	-0,351782
10:25:50	23,489876	23,715714	-0,004227	0,671628	-0,225838	-0,675855
10:25:55	23,489876	23,715714	-0,005441	0,709906	-0,225838	-0,715347
10:26:0	23,561737	23,715714	0,031622	0,374049	-0,153977	-0,342427
10:26:5	23,58226	23,787567	-0,003728	0,662202	-0,205307	-0,66593
10:26:10	23,561737	23,715714	-0,009869	0,727259	-0,153977	-0,737128
10:26:15	23,572006	23,787567	0,044119	0,341913	-0,215561	-0,297794
10:26:20	23,58226	23,787567	0,037621	0,699122	-0,205307	-0,661501
10:26:25	23,643852	23,725983	0,0012	0,619497	-0,082131	-0,618297
10:26:30	23,654121	23,797836	0,000914	0,316133	-0,143715	-0,315219
10:26:35	23,654121	23,797836	0,032765	0,305207	-0,143715	-0,272442
10:26:40	23,664391	23,797836	0,005056	0,619639	-0,133445	-0,614583
10:26:45	23,643852	23,797836	0,01484	0,641992	-0,153984	-0,627152
10:26:50	23,67466	23,828636	0,023053	0,363265	-0,153976	-0,340212
10:26:55	23,664391	23,869713	0,025123	0,70812	-0,205322	-0,682997
10:27:0	23,725983	23,879967	0,027052	0,705621	-0,153984	-0,678569
10:27:5	23,746506	23,869713	0,004057	0,330058	-0,123207	-0,326001
10:27:10	23,736237	23,869713	-0,015511	0,670557	-0,133476	-0,686068
10:27:15	23,736237	23,962097	-0,009726	0,649062	-0,22586	-0,658788
10:27:20	23,725983	23,879967	-0,011012	0,684554	-0,153984	-0,695566
10:27:25	23,746506	23,951828	-0,011012	0,64242	-0,205322	-0,653432

Продолжение таблицы 15

10:27:30	23,818382	23,879967	-0,011012	0,615926	-0,061585	-0,626938
10:27:35	23,818382	23,951828	-0,015368	0,65756	-0,133446	-0,672928
10:27:40	23,818382	23,951828	-0,015368	0,649276	-0,133446	-0,664644
10:27:45	23,818382	23,951828	-0,015368	0,656846	-0,133446	-0,672214
10:27:50	23,828636	23,962097	-0,013511	0,657274	-0,133461	-0,670785
10:27:55	23,828636	24,044212	-0,01244	0,65806	-0,215576	-0,6705
10:28:0	23,900497	24,044212	-0,01194	0,653132	-0,143715	-0,665072
10:28:5	23,900497	24,044212	-0,014154	0,574006	-0,143715	-0,58816
10:28:10	23,900497	24,044212	-0,014154	0,600858	-0,143715	-0,615012
10:28:15	23,900497	24,044212	-0,014154	0,65806	-0,143715	-0,672214
10:28:20	23,98262	24,044212	-0,014154	0,672842	-0,061592	-0,686996
10:28:25	23,98262	24,126343	-0,014154	0,625281	-0,143723	-0,639435
10:28:30	23,98262	24,116074	-0,014154	0,647133	-0,133454	-0,661287
10:28:35	23,972366	24,126343	-0,014154	0,599644	-0,153977	-0,613798
10:28:40	24,01342	24,116074	-0,014154	0,632494	-0,102654	-0,646648
10:28:45	23,98262	24,116074	-0,014154	0,623139	-0,133454	-0,637293
10:28:50	24,054482	24,116074	-0,014154	0,622639	-0,061592	-0,636793
10:28:55	24,064751	24,136612	-0,014154	0,589217	-0,071861	-0,603371
10:29:0	24,07502	24,126343	-0,014154	0,597644	-0,051323	-0,611798
10:29:5	24,064751	24,198204	-0,014154	0,64799	-0,133453	-0,662144
10:29:10	24,07502	24,208473	-0,014154	0,670343	-0,133453	-0,684497
10:29:15	24,15715	24,208473	-0,014154	0,70862	-0,051323	-0,722774
10:29:20	24,146881	24,198204	-0,014154	0,720761	-0,051323	-0,734915
10:29:25	24,146881	24,208473	-0,014154	0,676484	-0,061592	-0,690638
10:29:30	24,146881	24,280327	-0,014154	0,659774	-0,133446	-0,673928
10:29:35	24,228996	24,280327	-0,014154	0,632208	-0,051331	-0,646362
10:29:40	24,228996	24,290596	-0,014154	0,682126	-0,0616	-0,69628
10:29:45	24,228996	24,198204	-0,014154	0,621925	0,030792	-0,636079
10:29:50	24,228996	24,198204	-0,014154	0,60857	0,030792	-0,622724
10:29:55	24,228996	24,280327	-0,014154	0,662559	-0,051331	-0,676713
10:30:0	24,239265	24,280327	-0,014154	0,596716	-0,041062	-0,61087
10:30:5	24,311127	24,372711	-0,014154	0,620925	-0,061584	-0,635079
10:30:10	24,311127	24,352188	-0,014154	0,683126	-0,041061	-0,69728
10:30:15	24,311127	24,280327	-0,014154	0,663416	0,0308	-0,67757
10:30:20	24,311127	24,280327	-0,014154	0,592717	0,0308	-0,606871
10:30:25	24,393257	24,290596	-0,014154	0,581719	0,102661	-0,595873
10:30:30	24,393257	24,362457	-0,014154	0,594216	0,0308	-0,60837
10:30:35	24,403511	24,362457	-0,014154	0,612855	0,041054	-0,627009
10:30:40	24,393257	24,362457	-0,014154	0,592359	0,0308	-0,606513
10:30:45	24,393257	24,362457	-0,014154	0,648633	0,0308	-0,662787
10:30:50	24,393257	24,372711	-0,008298	0,673057	0,020546	-0,681355
10:30:55	24,393257	24,454842	-0,008369	0,69091	-0,061585	-0,699279
10:31:0	24,485641	24,454842	-0,012369	0,629923	0,030799	-0,642292
10:31:5	24,485641	24,465111	-0,015082	0,69041	0,02053	-0,705492
10:31:10	24,485641	24,444588	-0,015082	0,724974	0,041053	-0,740056
10:31:15	24,485641	24,444588	-0,015082	0,714262	0,041053	-0,729344
10:31:20	24,495911	24,454842	-0,015082	0,696409	0,041069	-0,711491
10:31:25	24,567764	24,444588	-0,015082	0,642277	0,123176	-0,657359
10:31:30	24,567764	24,485641	-0,015082	0,632637	0,082123	-0,647719

Окончание таблицы 15

10:31:35	24,578033	24,444588	-0,015082	0,653561	0,133445	-0,668643
10:31:40	24,578033	24,444588	-0,015082	0,598215	0,133445	-0,613297
10:31:45	24,567764	24,526703	-0,015082	0,559866	0,041061	-0,574948
10:31:50	24,567764	24,526703	-0,015082	0,58836	0,041061	-0,603442
10:31:55	24,567764	24,526703	-0,015082	0,57772	0,041061	-0,592802
10:32:0	24,670418	24,526703	-0,015082	0,494309	0,143715	-0,509391
10:32:5	24,670418	24,619087	-0,004085	0,480455	0,051331	-0,48454
10:32:10	24,670418	24,608818	-0,002871	0,448319	0,0616	-0,45119
10:32:15	24,670418	24,557495	-0,008155	0,453389	0,112923	-0,461544
10:32:20	24,660149	24,619087	0,002628	0,479098	0,041062	-0,47647
10:32:25	24,660149	24,608818	0,007199	0,436678	0,051331	-0,429479
10:32:30	24,649895	24,619087	0,012983	0,41504	0,030808	-0,402057
10:32:35	24,742279	24,619087	0,027766	0,380833	0,123192	-0,353067
10:32:40	24,649895	24,608818	0,053117	0,376263	0,041077	-0,323146
10:32:45	24,742279	24,619087	0,07247	0,353553	0,123192	-0,281083
10:32:50	24,752548	24,629356	0,068828	0,325416	0,123192	-0,256588
10:32:55	24,742279	24,711487	0,069543	0,387475	0,030792	-0,317932
10:33:0	24,752548	24,701218	0,058473	0,367479	0,05133	-0,309006
10:33:3	24,752548	24,711487	0,058473	0,367479	0,041061	-0,309006

По результатам таблицы 15 строим графики изменения температуры и давления от времени до и после кавитатора (рис.24,25).

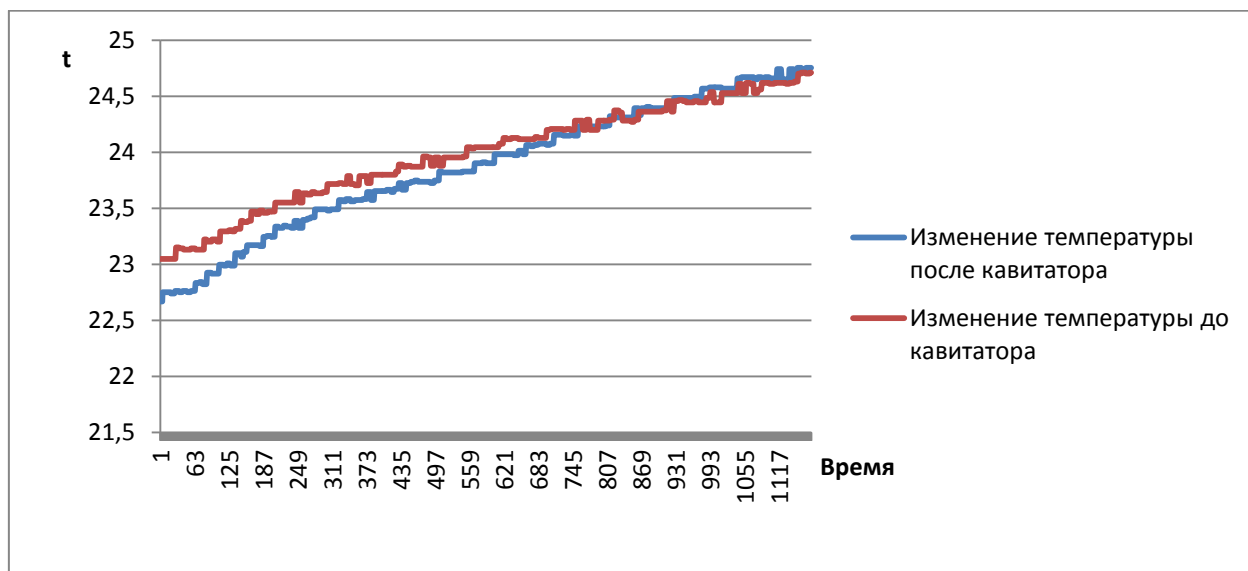


Рисунок 24 – График изменения во времени температуры до и после кавитатора

График, изображенный на рисунке 24, позволяет отслеживать динамику изменения температуры до и после кавитатора с течением времени. Из графика видно, что изначально температура воды до и после кавитатора была 22,75 и 23,05 °С соответственно. С течением времени видно, что температура после кавитатора стала выше чем до кавитатора. Это свидетельствует о появлении процесса кавитации.

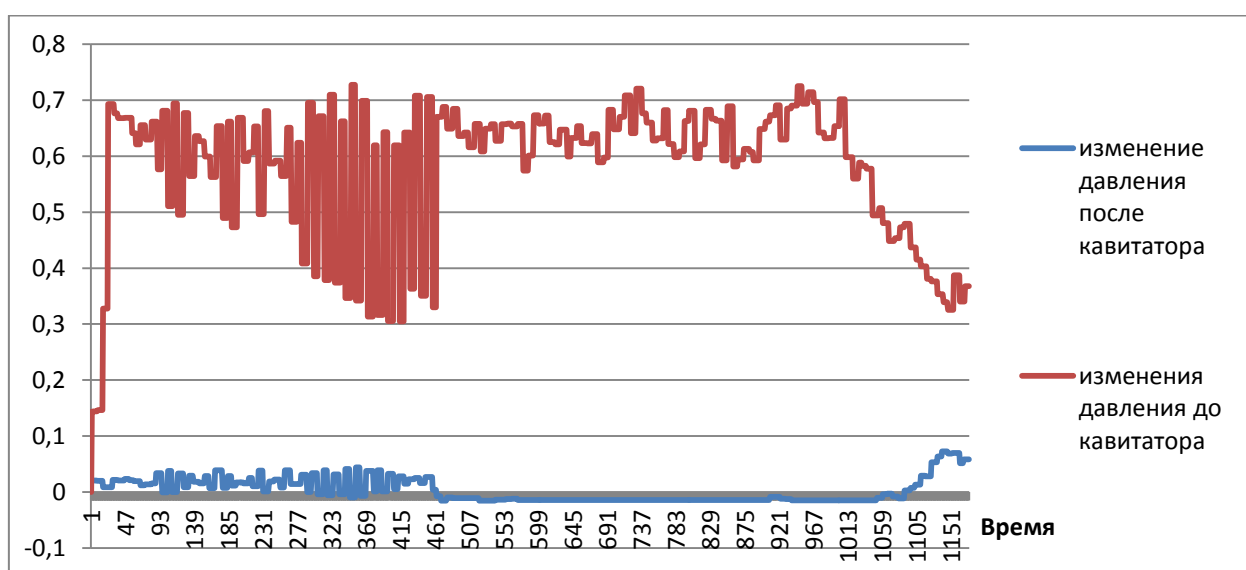


Рисунок 25 –График изменение давления от времени до и после кавитатора

График, изображенный на рисунке 25, позволяет отслеживать динамику изменения давления до и после кавитатора с течением времени. Из графика видно, что изначально давление до кавитатора и после находится на одном уровне. Скачки давления на графике до кавитатора свидетельствуют о включении ударного узла в работу и появлении гидравлических ударов в системе. Работа гидроаккумулятора сохраняет давление после кавитаторанеизменным.

Результаты эксперимента № 3 показаны в таблице № 16.

Таблица 16 – Результаты эксперимента №3

Время	Значение температуры после кавитатора, °C	Значение температуры до кавитатора, °C	Значение давления после кавитатора, кг/см ²	Значение давления до кавитатора, кг/см ²	Δt до и после кавитатора, °C	ΔP до и после кавитатора, кг/см ²
10:50:25	22,750748	23,222961	0,026766	0,287782	-0,472213	-0,261016
10:50:30	22,750748	23,294823	0,024838	0,290924	-0,544075	-0,266086
10:50:35	22,761017	23,294823	0,024481	0,292138	-0,533806	-0,267657
10:50:40	22,771271	23,294823	0,026409	0,308777	-0,523552	-0,282368
10:50:45	22,750748	23,305092	0,026909	0,29428	-0,554344	-0,267371
10:50:50	22,761017	23,305092	0,027409	0,314847	-0,544075	-0,287438
10:50:55	22,761017	23,387222	0,025266	0,293138	-0,626205	-0,267872
10:51:0	22,832863	23,387222	0,026909	0,297494	-0,554359	-0,270585
10:51:5	22,832863	23,387222	0,025195	0,299565	-0,554359	-0,27437
10:51:10	22,832863	23,376953	0,027194	0,314276	-0,54409	-0,287082
10:51:15	22,843132	23,376953	0,025909	0,301493	-0,533821	-0,275584
10:51:20	22,832863	23,469337	0,027409	0,322988	-0,636474	-0,295579
10:51:25	22,915001	23,489876	0,027409	0,30335	-0,574875	-0,275941
10:51:30	22,843132	23,469337	0,027552	0,31349	-0,626205	-0,285938
10:51:35	22,843132	23,469337	0,023838	0,304635	-0,626205	-0,280797
10:51:40	22,915001	23,469337	0,026909	0,298208	-0,554336	-0,271299
10:51:45	22,925255	23,551468	0,024909	0,300065	-0,626213	-0,275156
10:51:50	22,925255	23,541199	0,027123	0,315276	-0,615944	-0,288153
10:51:55	22,925255	23,541199	0,024766	0,293638	-0,615944	-0,268872
10:52:0	22,925255	23,551468	0,027123	0,316418	-0,626213	-0,289295
10:52:5	22,915001	23,551468	0,026266	0,301422	-0,636467	-0,275156
10:52:10	22,915001	23,551468	0,305992	0,342913	-0,636467	-0,036921
10:52:15	23,017654	23,561737	0,337342	0,364551	-0,544083	-0,027209
10:52:20	22,997131	23,633583	0,027552	0,330701	-0,636452	-0,303149
10:52:25	23,007385	23,623329	0,025695	0,313633	-0,615944	-0,287938
10:52:30	22,997131	23,633583	0,026695	0,306778	-0,636452	-0,280083
10:52:35	23,027916	23,623329	0,023338	0,301136	-0,595413	-0,277798
10:52:40	22,997131	23,623329	0,034907	0,341342	-0,626198	-0,306435
10:52:45	23,079247	23,715714	0,024409	0,285711	-0,636467	-0,261302
10:52:50	23,089516	23,684914	0,03912	0,296066	-0,595398	-0,256946
10:52:55	23,099785	23,695183	-0,005656	0,161451	-0,595398	-0,167107
10:53:0	23,089516	23,623329	0,019482	0,167379	-0,533813	-0,147897
10:53:5	23,171631	23,808105	0,001628	0,196801	-0,636474	-0,195173
10:53:10	23,171631	23,715714	0,014411	0,139171	-0,544083	-0,12476
10:53:15	23,1819	23,777313	-0,007013	0,222296	-0,595413	-0,229309
10:53:20	23,151108	23,797836	0,006413	0,368764	-0,646728	-0,362351
10:53:25	23,192169	23,797836	0,000772	0,272571	-0,605667	-0,271799
10:53:30	23,233223	23,869713	0,054403	0,406328	-0,63649	-0,351925
10:53:35	23,253761	23,797836	0,01234	0,286782	-0,544075	-0,274442
10:53:40	23,233223	23,890236	0,046619	0,35391	-0,657013	-0,307291
10:53:45	23,335892	23,879967	0,008627	0,14267	-0,544075	-0,134043
10:53:50	23,325623	23,879967	0,043262	0,345412	-0,554344	-0,30215
10:53:55	23,407745	23,951828	0,043262	0,144955	-0,544083	-0,101693

Продолжение таблицы 16

10:54:0	23,407745	23,962097	0,040335	0,342341	-0,554352	-0,302006
10:54:5	23,407745	23,962097	0,021196	0,117175	-0,554352	-0,095979
10:54:10	23,407745	23,951828	-0,001371	0,142741	-0,544083	-0,144112
10:54:15	23,428276	24,033943	0,014626	0,132458	-0,605667	-0,117832
10:54:20	23,50013	24,033943	0,042905	0,122388	-0,533813	-0,079483
10:54:25	23,50013	24,023689	0,016911	0,131744	-0,523559	-0,114833
10:54:30	23,50013	24,033943	0,016911	0,245362	-0,533813	-0,228451
10:54:35	23,50013	24,126343	0,020839	0,373978	-0,626213	-0,353139
10:54:40	23,50013	24,116074	0,02341	0,102893	-0,615944	-0,079483
10:54:45	23,50013	24,033943	0,023267	0,097822	-0,533813	-0,074555
10:54:50	23,50013	24,116074	0,018125	0,121032	-0,615944	-0,102907
10:54:55	23,50013	24,126343	-0,001228	0,136028	-0,626213	-0,137256
10:55:0	23,602798	24,126343	-0,008655	0,131886	-0,523545	-0,140541
10:55:5	23,572006	24,126343	0,022267	0,115461	-0,554337	-0,093194
10:55:10	23,58226	24,10582	0,015197	0,14624	-0,52356	-0,131043
10:55:15	23,58226	24,116074	0,020696	0,249076	-0,533814	-0,22838
10:55:20	23,58226	24,198204	0,021553	0,164308	-0,615944	-0,142755
10:55:25	23,602798	24,218727	0,076898	0,393473	-0,615929	-0,316575
10:55:30	23,592529	24,290596	0,053689	0,404542	-0,698067	-0,350853
10:55:35	23,572006	24,198204	0,032693	0,394973	-0,626198	-0,36228
10:55:40	23,654121	24,280327	0,009841	0,300422	-0,626206	-0,290581
10:55:45	23,664391	24,218727	0,024481	0,288353	-0,554336	-0,263872
10:55:50	23,654121	24,280327	0,024981	0,284997	-0,626206	-0,260016
10:55:55	23,746506	24,280327	0,039192	0,329916	-0,533821	-0,290724
10:56:0	23,736237	24,372711	0,043691	0,388117	-0,636474	-0,344426
10:56:5	23,818382	24,300858	0,057545	0,354267	-0,482476	-0,296722
10:56:10	23,828636	24,38298	0,0002	0,371121	-0,554344	-0,370921
10:56:15	23,818382	24,38298	0,00827	0,272142	-0,564598	-0,263872
10:56:20	23,879967	24,38298	-0,007227	0,332272	-0,503013	-0,339499
10:56:25	23,910767	24,372711	0,006128	0,271785	-0,461944	-0,265657
10:56:30	23,910767	24,454842	0,006128	0,121531	-0,544075	-0,115403
10:56:35	23,900497	24,454842	0,021838	0,12903	-0,554345	-0,107192
10:56:40	23,992889	24,454842	0,021838	0,1371	-0,461953	-0,115262
10:56:45	23,992889	24,536972	0,01941	0,133457	-0,544083	-0,114047
10:56:50	23,992889	24,454842	0,056117	0,144098	-0,461953	-0,087981
10:56:55	24,07502	24,536972	0,020839	0,10375	-0,461952	-0,082911
10:57:0	24,07502	24,536972	0,021339	0,133315	-0,461952	-0,111976
10:57:5	23,992889	24,536972	0,021696	0,139028	-0,544083	-0,117332
10:57:10	24,07502	24,547241	0,02141	0,134386	-0,472221	-0,112976
10:57:15	24,07502	24,536972	0,006699	0,128387	-0,461952	-0,121688
10:57:20	24,07502	24,619087	0,020553	0,339985	-0,544067	-0,319432
10:57:25	24,07502	24,619087	0,021696	0,111034	-0,544067	-0,089338
10:57:30	24,15715	24,619087	0,021838	0,138456	-0,461937	-0,116618
10:57:35	24,167404	24,598564	0,021696	0,136814	-0,431116	-0,115118
10:57:40	24,167404	24,619087	0,020053	0,132743	-0,451683	-0,11269
10:57:45	24,167404	24,619087	0,065401	0,141884	-0,451683	-0,076483
10:57:50	24,15715	24,619087	0,02041	0,104464	-0,461937	-0,084054
10:57:55	24,167404	24,690948	0,022053	0,138099	-0,523544	-0,116046
10:58:0	24,146881	24,701218	0,021481	0,133672	-0,554337	-0,112191

					Лист	
					51	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	МД-02069964-13.04.01-07-18	

Окончание таблицы 16

10:58:5	24,15715	24,608818	0,02191	0,134671	-0,451668	-0,112761
10:58:10	24,15715	24,701218	0,037264	0,138028	-0,544068	-0,100764
10:58:15	24,15715	24,701218	0,025695	0,138099	-0,544068	-0,112404
10:58:20	24,15715	24,701218	0,021838	0,105106	-0,544068	-0,083268
10:58:25	24,15715	24,701218	0,021267	0,134671	-0,544068	-0,113404
10:58:30	24,146881	24,701218	0,021981	0,128816	-0,554337	-0,106835
10:58:35	24,167404	24,783348	0,02041	0,136957	-0,615944	-0,116547
10:58:40	24,15715	24,701218	0,031908	0,131458	-0,544068	-0,09955
10:58:45	24,239265	24,79361	0,017054	0,106178	-0,554345	-0,089124
10:58:50	24,239265	24,783348	0,021767	0,097322	-0,544083	-0,075555
10:58:55	24,239265	24,783348	0,021481	0,370978	-0,544083	-0,349497
10:59:0	24,239265	24,783348	0,023267	0,117389	-0,544083	-0,094122
10:59:5	24,239265	24,844933	-0,009798	0,305778	-0,605668	-0,315576
10:59:10	24,228996	24,855202	-0,008798	0,186232	-0,626206	-0,19503

По результатам таблицы 16 построены графики изменения температуры и давления от времени до и после кавитатора (рис. 26,27).

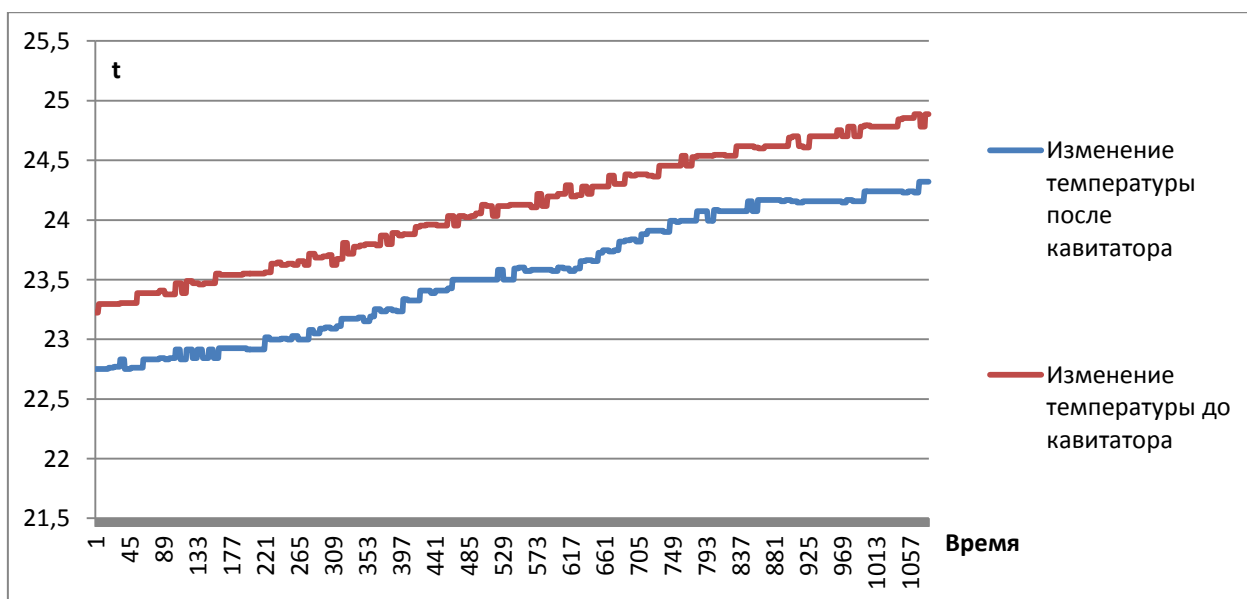


Рисунок 26 – График изменение температуры от времени до и после кавитатора

График, изображенный на рисунке 26, позволяет отслеживать динамику изменения температуры до и после кавитатора с течением времени. Из графика видно, что изначально температура воды до и после кавитатора была 23,25 и 22,75 °C соответственно. С течением времени видно, что

температура после и до кавитатора не изменяется. Это свидетельствует об отсутствии процесса кавитации.

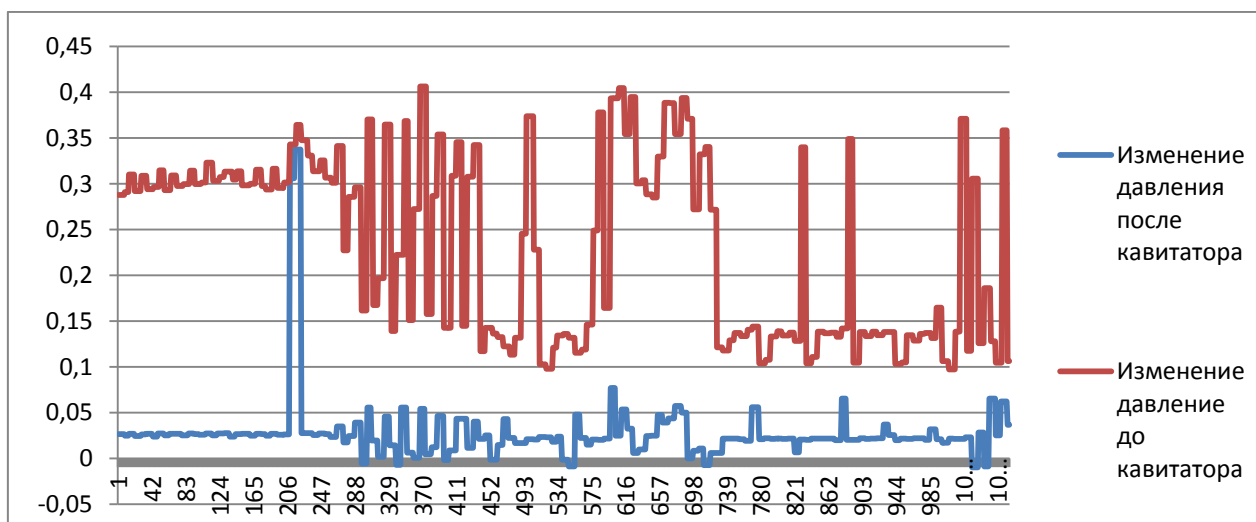


Рисунок 27 – График изменение давления от времени до и после кавитатора

По результатам таблицы 14, 15, 16 построены графики изменения давления и температуры от времени до и после кавитатора (рис. 28, 29).

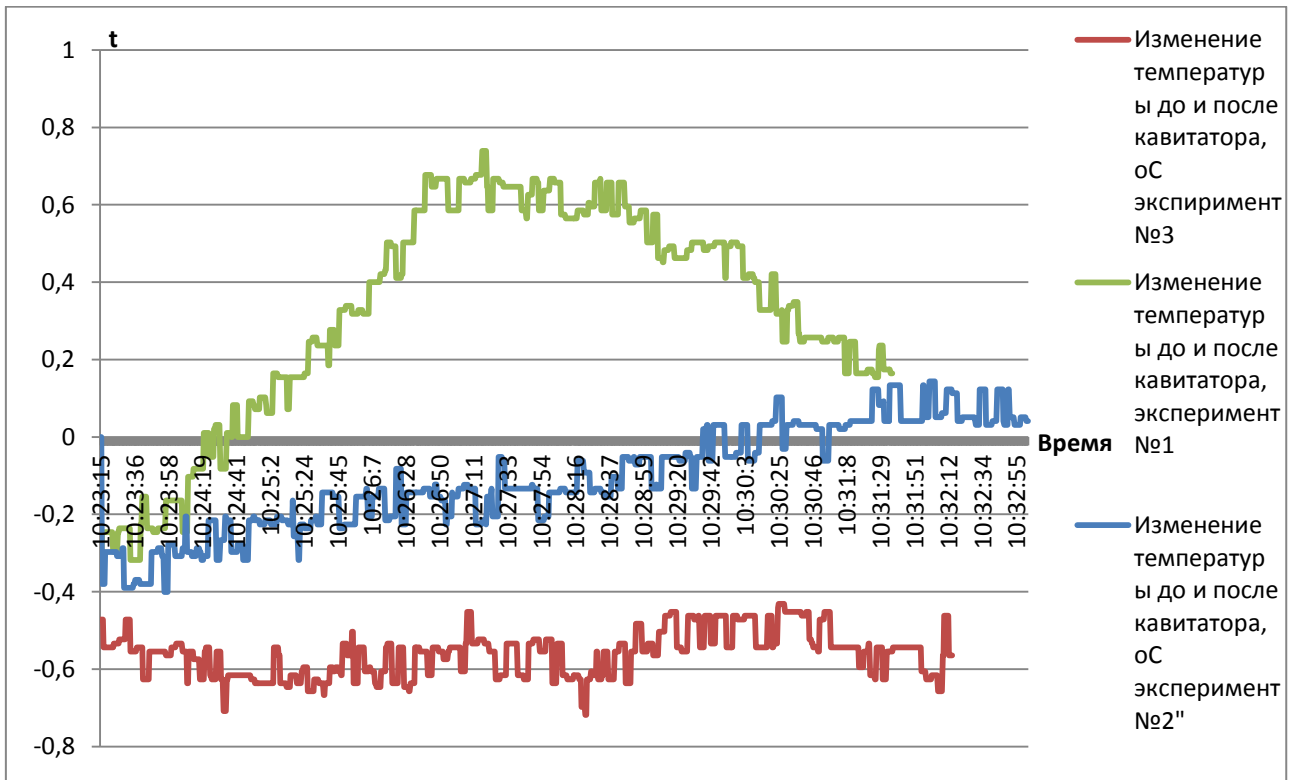


Рисунок 28 –График изменения температуры от времени до и после кавитатора

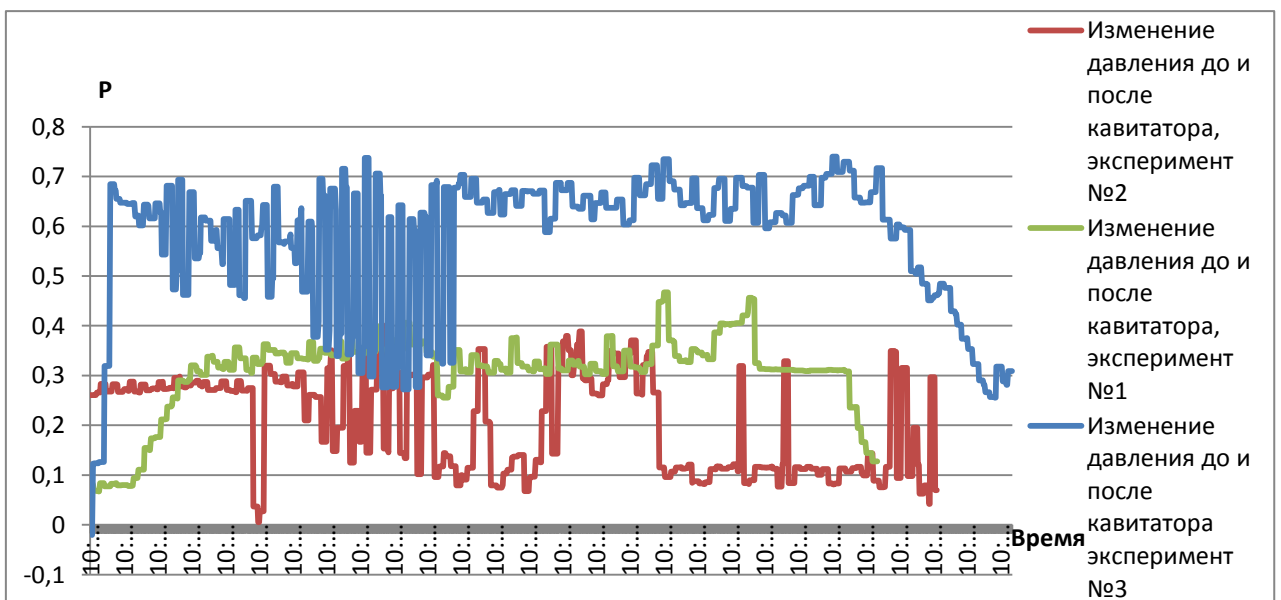


Рисунок 29 –График изменения давления от времени после кавитатора

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

МД-02069964-13.04.01-07-18

Лист

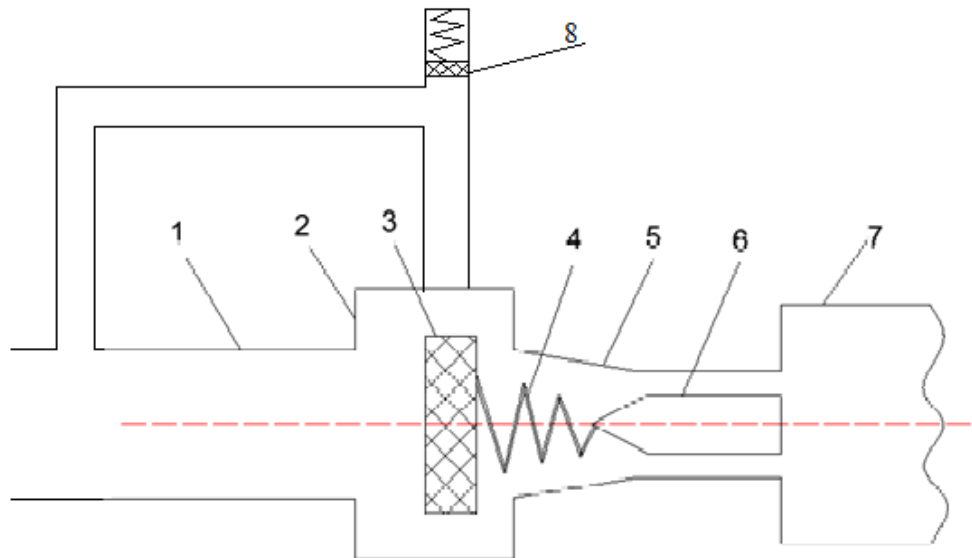
54

График, изображенный на рисунке 28, позволяет отслеживать динамику изменения температуры до и после кавитатора с течением времени. Скачки давления на графике (рисунок 29) до кавитатора свидетельствуют о включении ударного узла в работу и появлении гидравлических ударов в системе. Работа гидроаккумулятора сохраняет давление после кавитаторанеизменным. По результатам первого эксперимента с конусной насадкой (30 град) в начальный момент времени изменение температуры было $-0,32^{\circ}\text{C}$. Через 30 секунд в системе был включен ударный узел с электроприводом и изменение температуры приобрело положительное значение и достигло отметки в $0,74^{\circ}\text{C}$. Таким образом, как видно из графиков происходит процесс кавитации и нагрев воды на $1,06^{\circ}\text{C}$. По результатам второго эксперимента с конусной насадкой (45 град) изменение температуры до и после кавитатора в начальный момент времени было $-0,38^{\circ}\text{C}$. После включения в системе ударного узла с электроприводом изменение температуры приобрело положительное значение и достигло своего максимума в отметке $0,17^{\circ}\text{C}$. Таким образом, как видно из графиков происходит процесс кавитации и нагрев воды на $0,55^{\circ}\text{C}$. По результатам третьего эксперимента с конусной насадкой (60 град) изменение температуры до и после кавитатора в начальный момент времени было $-0,5^{\circ}\text{C}$. После включения в системе ударного узла с электроприводом изменение температуры не менялось и оставалось в пределах значения $-0,5^{\circ}\text{C}$. Таким образом, как видно из графиков процесс кавитации кавитации отсутствует, следовательно, эффект нагрева теплоносителя также отсутствует.

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

4.3 Проверка адекватности математической модели по результатам экспериментальных данных

Рассмотрим схему струйного кавитатора показанную на рисунке 30.



1 – входная труба 2 – корпус 3 - клапан, 4 - пружина
5-сужение 6-конусное сопло 7-выходная труба 8-клапан

Рисунок 30 – Схема струйного кавитатора

На рисунке 31 показана энергетическая цепь струйного кавитатора.

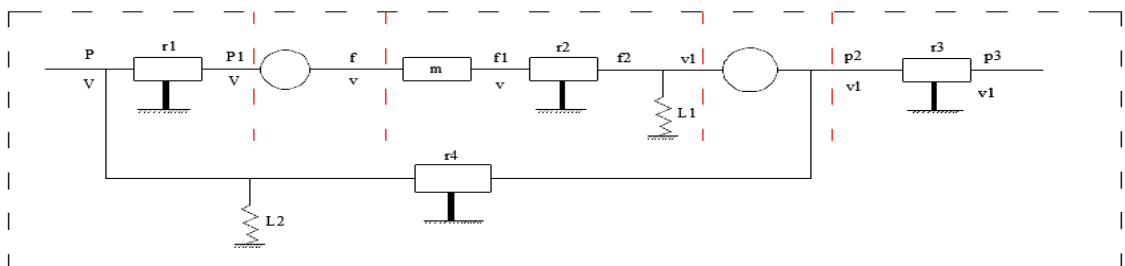


Рисунок 31 – Энергетическая цепь струйного кавитатора

Уравнение звеньев цепи:

$$(1) p = r_1 v^2 + p_1 \quad (2) \begin{cases} f = p_1 s \\ v = \frac{V}{s} \end{cases} \quad (3) \begin{cases} f = m \dot{v} + r_2 v + f_2 \\ v = l_1 \dot{f}_2 + v_1 \end{cases}$$

$$(4) \begin{cases} p_2 s = f_2 \\ V_1/s = v_1 \end{cases} \quad (5) \begin{cases} p_2 = p - r_4 V_1^2 \\ V = l_2 \dot{p}_2 + V_1 \end{cases} \quad (6) p_2 = r_3 v_1^2 + p_3$$

Определение параметров энергетической цепи:

$$l_1 = 50, l_2 = 25, s = 0,0026, V_{10} = 10, m = 200, r_1 = 0,5, r_2 = 26, \\ r_3 = 0,2, r_4 = 0,1, p_3 = 100.$$

Алгоритм построения частотных характеристик:

$$P_2 = P_{20} + \overline{P_2}, \quad (15)$$

$$V_1 = V_{10} + \overline{V_1}, \quad (16)$$

$$\dot{p}_2 = \overline{\dot{p}_2}, \quad (17)$$

$$f_2 = p_2 s = s p_{20} + s \overline{p_2}, \quad (18)$$

$$\dot{f}_2 = s * \overline{\dot{p}_2}, \quad (19)$$

$$v_1 = \frac{V}{s} = \frac{1}{s} v_{10} + \frac{1}{s} \overline{V_1}, \quad (20)$$

$$v = l_1 \dot{f}_2 + v_1 = l_1 s \overline{\dot{p}_2} + \frac{1}{s} v_{10} + \frac{1}{s} \overline{V_1}, \quad (21)$$

$$\dot{v} = l_1 s \overline{\ddot{p}_2} + \frac{1}{s} \overline{\dot{V}_1}, \quad (22)$$

$$f = ml_1 s \ddot{\bar{p}}_2 + \frac{m}{s} \dot{\bar{V}}_1 + sr_2 l_1 \dot{\bar{P}}_2 + \frac{1}{s} r_2 V_{10} + \frac{1}{s} r_2 \bar{V} + Sp_{20} + S\bar{p}_2, \quad (23)$$

$$p_1 = \frac{f}{s} = ml_1 \ddot{\bar{p}}_2 + \frac{m}{s^2} \dot{\bar{V}}_1 + r_2 l_1 \dot{\bar{P}}_2 + \frac{1}{s^2} r_2 V_{10} + \frac{1}{s^2} r_2 \bar{V} + p_{20} + \bar{p}_2, \quad (24)$$

$$V = vs = l_1 s^2 \dot{\bar{P}}_2 + v_{10} + \bar{V}_1, \quad (25)$$

$$V^2 = \left(V_{10} + \left(l_1 s^2 \dot{\bar{P}}_2 + \bar{V}_1 \right) \right)^2 \approx V_{10}^2 + 2V_{10} l_1 s^2 \dot{\bar{P}}_2 + 2v_{10} \bar{V}_1, \quad (26)$$

$$\begin{aligned} p &= r_1 V^2 + p_1 = r_1 V_{10}^2 + 2s^2 V_{10} l_1 r_1 \dot{\bar{p}}_2 + 2r_1 V_0 \bar{V}_1 + ml_1 \ddot{\bar{p}}_2 + \\ &\quad + r_2 l_1 \dot{\bar{P}}_2 + \bar{p}_2 + p_{20} + \frac{m}{s^2} \dot{\bar{V}}_1 + \frac{r_2}{s^2} V_{10} = \\ &= ml_1 \ddot{\bar{p}}_2 + (r_2 l_1 + 2s^2 V_{10} l_1 r_1) \dot{\bar{P}}_2 + \bar{p}_2 + p_{20} + \frac{m}{s^2} \dot{\bar{V}}_1 + \\ &\quad + (2r_1 V_0) \bar{V}_1 + (r_1 V_{10}^2 + \frac{r_2}{s^2} V_{10}). \end{aligned} \quad (27)$$

Уравнения с коэффициентами:

$$p = a_1 \ddot{\bar{p}}_2 + a_2 \dot{\bar{P}}_2 + a_3 \bar{p}_2 + a_4 + b_1 \dot{\bar{V}}_1 + b_2 \bar{V}_1 + b_3 \quad (28)$$

Преобразовывая уравнение получаем:

$$(a_1 \ddot{\bar{p}}_2 + a_2 \dot{\bar{P}}_2 + a_3 \bar{p}_2 + a_4) p_2(S) = - \left(b_1 \dot{\bar{V}}_1 + b_2 \bar{V}_1 + b_3 \right) V_1(S) \quad (29)$$

Комплексное сопротивление цепи:

$$Z_1(S) = \frac{p_2(S)}{V_1(S)} = \frac{-(b_1 S + b_2 + 1)}{(a_1 S^2 + a_2 S + a_3 + 1)}, \quad (30)$$

$$V_1^2 \approx V_{10}^2 + 2V_{10} \bar{V}_1, \quad (31)$$

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58

$$P_2 = P_{20} + \overline{P_2}, \quad (32)$$

$$\dot{P}_2 = \dot{\overline{P_2}}, \quad (33)$$

$$p = p_2 + r_4 V_1^2 = r_4 V_{10}^2 + 2V_{10} \overline{V_1} r_4 + P_{20} + \overline{P_2}, \quad (34)$$

$$V = l_2 \dot{P}_2 + V_{10} + \overline{V_1} = l_2 \dot{\overline{P_2}} + V_{10} + \overline{V_1} \quad (35)$$

Уравнение с коэффициентами:

$$V = a_4 \dot{\overline{P_2}} + b_3 \overline{V_1} + b_4 \quad (36)$$

Преобразовывая получаем уравнение:

$$a_4 \dot{\overline{P_2}} * p_2(S) = -(b_3 \overline{V_1} + b_4) V_1(S). \quad (37)$$

Комплексное сопротивление цепи:

$$Z_2(S) = \frac{p_2(S)}{V_1(S)} = \frac{-(b_3 + 1)}{a_4 S} \quad (38)$$

$$V_1^2 \approx V_{10}^2 + 2V_{10} \overline{V_1} \quad (39)$$

$$P_3 = P_{30} + \overline{P_3} \quad (40)$$

$$P_2 = r_3 V_{10}^2 + 2V_{10} \overline{V_1} r_3 + P_{30} + \overline{P_3} \quad (41)$$

Уравнение с коэффициентами:

$$P_2 = a_5 \overline{P_3} + a_6 + b_4 \overline{V_1} + b_5 \quad (42)$$

Преобразовывая уравнение получаем:

$$(a_5 \overline{P_3} + a_6) P_3(S) = (b_4 \overline{V_1} + b_5) V_1(S). \quad (43)$$

Комплексное сопротивление цепи:

$$Z_3(S) = \frac{p_3(S)}{V_1(S)} = \frac{-(b_4 + 1)}{a_5 + 1} \quad (44)$$

Вычисляем коэффициенты:

$$a_1 = m l_1 = 200 \cdot 50 = 10^4$$

$$a_2 = r_2 l_1 + 2s^2 V_{10} l_1 r_1 = 26 \cdot 50 + 2 \cdot 0.5 \cdot 50 \cdot 0.0026 \cdot 0.0026 = 38000$$

$$a_3 = 1$$

$$a_4 = l_2 = 25$$

$$b_1 = \frac{m}{s^2} = 30000$$

$$b_2 = 2r_1 V_0 = 2 \cdot 0.5 \cdot 10 = 10$$

$$b_3 = 1$$

$$b_4 = 2V_{10}\overline{V_1} = 2 \cdot 0.2 \cdot 10 = 4$$

$$a_5 = 1$$

Комплексное сопротивление цепи:

$$\begin{aligned} Z_{\Sigma}(S) &= \frac{P(S)}{V(S)} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} + Z_3 \\ &= \frac{\frac{-(b_1 S + b_2 + 1)}{(a_1 S^2 + a_2 S + a_3 + 1)} \cdot \frac{-(b_3 + 1)}{a_4 S}}{\frac{-(b_1 S + b_2 + 1)}{(a_1 S^2 + a_2 S + a_3 + 1)} + \frac{-(b_3 + 1)}{a_4 S}} + \frac{-(b_4 + 1)}{a_5 + 1} \end{aligned} \quad (45)$$

$$Z_{\Sigma}(S) = \frac{DS + E}{AS^2 + BS + C} \quad (46)$$

$$A = (a_4 a_5 b_1 + a_1 a_5 b_3 + a_1 a_5 + a_4 b_1 + a_1 b_3) + a_1$$

$$B = (a_4 a_5 b_2 + a_2 a_5 b_3 + a_2 a_5 + a_4 a_5 + a_4 b_2 + a_2 b_3 + a_2 + a_4)$$

$$C = (a_3 a_5 b_3 + a_3 a_5 + a_3 b_3 + a_3)$$

$$D = (a_5 b_1 b_3 - a_4 b_1 b_3 + a_5 b_1 - a_4 b_1)$$

$$E = (a_5 b_2 b_3 + a_4 b_2 b_3 + a_5 b_2 - a_4 b_2 + a_5 b_3 - a_4 b_3 + a_5 - a_4)$$

Частотная функция цепи:

$$\begin{aligned} Z(j\Omega) &= \frac{Dj\Omega + E}{-A\Omega^2 + Bj\Omega + C} = \frac{(Dj\Omega + E) \cdot (C - A\Omega^2 - Bj\Omega)}{(C - A\Omega^2 + Bj\Omega)(C - A\Omega^2 - Bj\Omega)} = \\ &= \frac{CDj\Omega - ADj\Omega^3 + BD\Omega^2 + CE - AE\Omega^2 - BEj\Omega}{(C - A\Omega^2)^2 + (B\Omega)^2} \end{aligned} \quad (47)$$

Действительная часть:

$$\operatorname{Re}(j\Omega) = \frac{(BD - AE)\Omega^2 + CE}{(C - A\Omega^2)^2 + (B\Omega)^2} \quad (48)$$

Мнимая часть:

$$\operatorname{Im}(j\Omega) = \frac{-AD\Omega^3 + (CD - BE)\Omega}{(C - A\Omega^2)^2 + (B\Omega)^2} \quad (49)$$

Амплитудно-частотная характеристика:

$$A(\Omega) = \sqrt{\operatorname{Re}(j\Omega)^2 + \operatorname{Im}(j\Omega)^2} \quad (50)$$

Фазо-частотная характеристика:

$$\varphi(\Omega) = -\operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Re}}{\operatorname{Im}} \quad (51)$$

Таблица 17 – Исходные данные для расчета частотных характеристик

a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅
10000	38000	1	25	1	30000	10	1	4	1

По результатам таблицы 17 строим графики амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристик (рис. 32, 33).

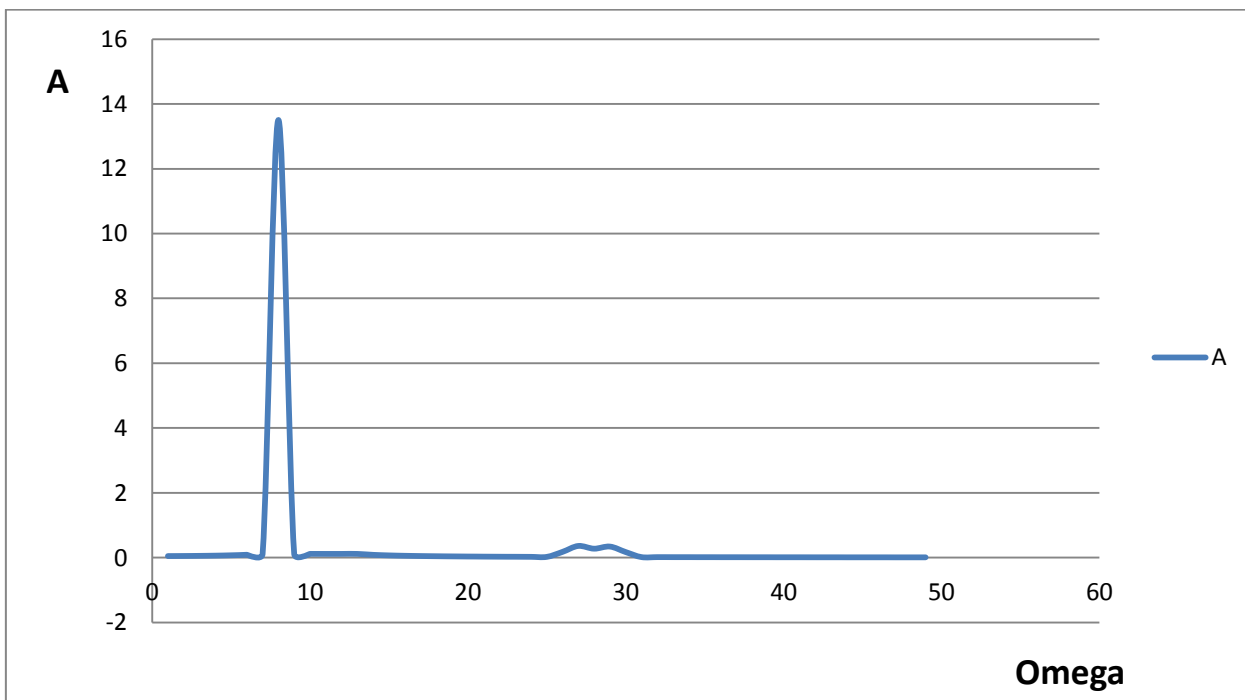


Рисунок 32 – Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) цепи

Как видно из графика (рис.9) имеется характерное увеличение амплитуды на частоте 8-10 рад/с.

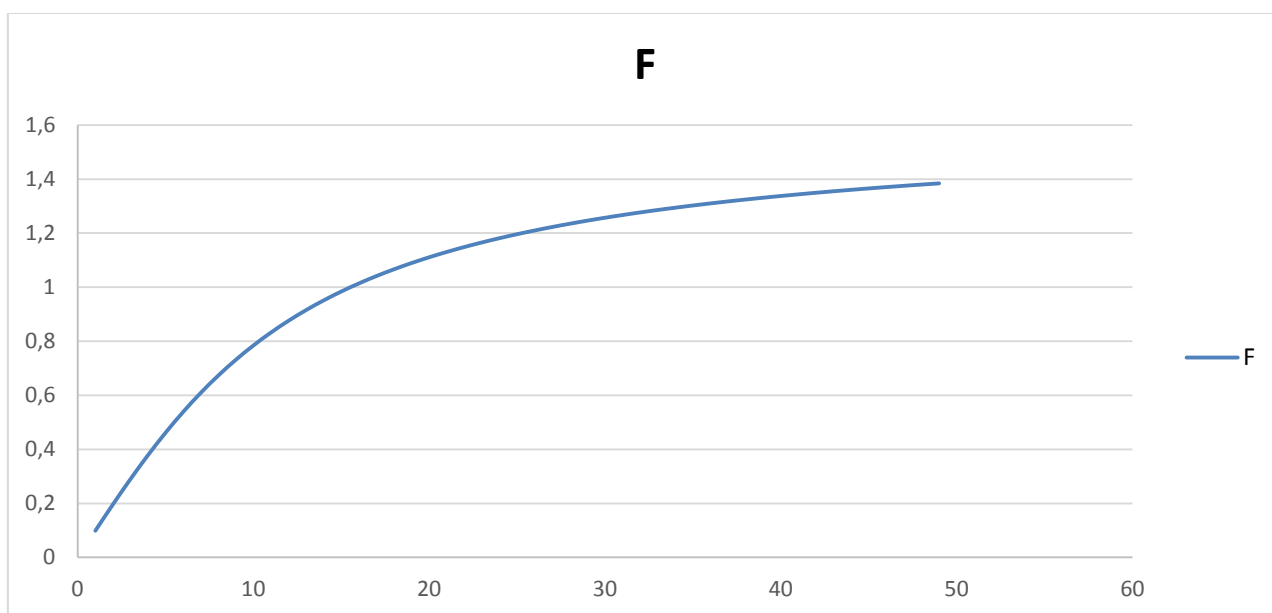


Рисунок 33 – Фазо-частотная характеристика (ФЧХ) цепи

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

МД-02069964-13.04.01-07-18

Лист

63

4.4 Проведение полного факторного эксперимента

Проводился эксперимент типа 2^3 , где число факторов $k=3$, число опытов $N=8$, число повторных опытов $n=3$.

Таблица 18 – Матрица планирования

Номер опыта	Матрица планирования								Рабочая матрица			Результаты параллельных экспериментов, $Y_{iu}, ^\circ\text{C}$	Среднее, $\bar{Y}_i, ^\circ\text{C}$
	X_0	X_1	X_2	X_3	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$	Частота гидравлических ударов	Угол конуса	Расход воды через кавитатор		
1	+	+	+	-	+	-	-	-	40	60	0,1	0,17 0,15 0,15	0,16
2	+	-	+	-	-	+	-	+	10	60	0,1	0 0 0	0
3	+	+	-	-	-	-	+	+	40	30	0,1	0,74 0,7 0,72	0,72
4	+	-	-	-	+	+	+	-	10	30	0,1	0,11 0,14 0,13	0,13
5	+	+	+	+	+	+	+	+	40	60	0,5	0,41 0,4 0,41	0,41
6	+	-	+	+	-	-	+	-	10	60	0,5	0,04 0,03 0,03	0,33

Окончание таблицы 18

7	+	+	-	+	-	+	-	-	40	30	0,5	1,06 1,05 1,05	1,057
8	+	-	-	+	+	-	-	+	10	30	0,5	0,37 0,38 0,36	0,37

После проведения опытов выполнена статистическая обработка результатов. Сначала определяли ошибки повторных (параллельных) опытов. Среднеквадратичное отклонение определяем по выражению:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (52)$$

где \bar{y} – среднее арифметическое значение параметра оптимизации из пяти повторных опытов (значения приведены в таблице 18).

Данные расчетов сведены в таблице 19.

Таблица 19 – Среднеквадратичное отклонение

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
S_i^2	$1,5 \cdot 10^{-8}$	0	$4 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-10}$	0,0018	$5,35 \cdot 10^{-10}$	10^{-8}
S_i	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0	$4 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	0043,	$5,35 \cdot 10^{-5}$	10^{-4}

Уравнение математической модели с учетом парных взаимодействий имеет вид:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (53)$$

Коэффициенты регрессии при полном факторном эксперименте определяют по выражениям:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{y}_i}{N} \quad (54)$$

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_{iu} \hat{y}_i}{N} \quad (55)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{iu} x_{ju} \hat{y}_i}{N}; \quad i \neq j \quad (56)$$

$$b_{ijk} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{iu} x_{ju} x_{ku} \hat{y}_i}{N}; \quad i \neq j \neq k. \quad (57)$$

Коэффициенты регрессии, рассчитанные по вышеприведенным выражениям, равны:

$$\begin{aligned} b_0 &= 0.397 & b_{12} &= 481.05 \\ b_1 &= 12.772 & b_{13} &= 19.205 \\ b_2 &= 15.289 & b_{23} &= 5.889 \\ b_3 &= 0,148 & b_{123} &= 176.175 \end{aligned}$$

С учетом значения дисперсии воспроизводимости $S^2(y)=0,005494$ с доверительной вероятностью $\alpha=0,95$ находим границы доверительных интервалов для коэффициентов регрессии:

$$\Delta b_i = \pm \frac{t \cdot S_{\{y\}}}{\sqrt{N}} \quad (58)$$

Теперь уравнение математической модели имеет вид:

$$\hat{y}=0.397+12.772 x_1+15.289 x_2+0.148 x_3+481.05 x_1 x_2 + \quad (59)$$

$$+19.205 x_1 x_3+5.889 x_2 x_3+176.175 x_1 x_2 x_3$$

Проверяем адекватность полученного уравнения.

Вычисляем теоретические значения параметра оптимизации y , величину ошибки:

$$\Delta y = y - \hat{y} \quad (60)$$

Результаты занесены в таблицу 20.

Таблица 20 – Параметр оптимизации

№	1	2	3	4	5	6	7	8
\hat{y}	$1.2 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$	$3.316 \cdot 10^6$	$1.368 \cdot 10^6$	$3.428 \cdot 10^5$	$6.862 \cdot 10^5$	$1.7 \cdot 10^5$
Δy	$-1.2 \cdot 10^6$	$-3 \cdot 10^5$	$-6 \cdot 10^5$	$-3.316 \cdot 10^6$	$-1.368 \cdot 10^6$	$-3.428 \cdot 10^5$	$-6.862 \cdot 10^5$	$-1.7 \cdot 10^5$
Δy^2	$1.436 \cdot 10^{12}$	$9.018 \cdot 10^{10}$	$3.594 \cdot 10^{10}$	$1.1 \cdot 10^{12}$	$1.871 \cdot 10^{12}$	$1.175 \cdot 10^{10}$	$4.709 \cdot 10^{10}$	$2.962 \cdot 10^{10}$

Рассчитаем дисперсию адекватности:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{f} = \frac{\sum \Delta y_i^2}{f} \quad (61)$$

где $f = N - (k + 1)$ - число степеней свободы.

Адекватность математической модели определяем по критерию Фишера:

$$F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S_{\{y\}}^2} \quad (62)$$

$$F_{табл.} = 6,4$$

$F_{расч.} \leq F_{табл.}$, следовательно модель адекватна.

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обзор и анализ литературных источников по проблеме повышения эффективности струйного кавитатора показал, что существует множество конструктивных решений струйных кавитаторов и они постоянно совершенствуются. Однако получить эффективную конструкцию (эффект 40% и выше) струйного кавитатора пока не получилось. Это обусловлено сложностью поддержания гидродинамических процессов. Одним из перспективных направлений повышения эффективности струйного кавитатора является включение его в контур с импульсной циркуляцией теплоносителя.

При рассмотрении конструктивных решений было выявлено, что наибольшим потенциалом обладают именно струйные кавитаторы. Это связано с тем, что струйные кавитаторы обладают рядом преимуществ:

- малое потребление энергии;
- небольшие удельные размеры;
- отсутствие износа, возможность применений в непрерывных и циклических технологических процессах;
- невысокая стоимость;
- низкие эксплуатационные затраты.

В процессе работы была разработана схема контура включения кавитатора в импульсную экспериментальную схему теплоснабжения, позволяющая в широком диапазоне моделировать гидравлические режимы и автоматизировано вести запись процессов, протекающих в кавитаторе.

Проведены испытания опытного образца кавитаторов в восьми гидравлических режимах, отличающихся друг от друга частотой прерывания потока в системе, расход через кавитатор и угол конуса насадки.

В процессе работы была разработана математическая модель в виде дифференциальных уравнений на приращение, полученных с помощью энергетических цепей. Уравнения решались в частотном виде при

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
						69
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

варьирование следующих параметров: масса, активное сопротивление, податливость. В результате моделирования выявлено, что наибольшее влияние оказывает масса. Также в процессе испытаний решалась задача проведения полного факторного эксперимента, в результате которого получено уравнение регрессии.

Адекватность математической модели оценивалась по приращению температуры на выходе кавитатора, сходимость опытных и расчетных значений находится на уровне 10 %.



3) Липинский Н. Кавитация в гидротехнике. М., Наука, 2000.

4) Рудавский В. В. Кавитация. Д.: Судостроение, 1977. - 240 с.

5) Фельдман Н. М., Гусев И. С. Кавитация, возникающая при движении жидкостей, ее предупреждение и ликвидация // Труды, отчеты и конструкции кавитационных аппаратов, М.: - М.: Издательство, 1991. - 240 с.

6) Кавитационные насосы высокого давления для ГТД тракторной техники / Ф. М. Волков, В. Букацкий, М. Давид (и др.) // Двигатели. - 2011. - №5 (11) - С. 18-21.

7) Клишик В. М. Динамика кавитационного насоса // Двигатели. - 2002. - №5 (21) - С. 38-41.

8) Fox, J.E. Fundamentals of Cavitation [Text] / J. E. Fox, J. M. Wood. - Кларк Academic Publishers. - 2012. - 428 p.

9) Кавитация в гидротехнике // Вестник Харьковского государственного университета. - 2004. - №16. - С. 11-14.

10) Андреевский В. А., Тимощенко А. Н. Об особенностях свободной кавитации в гидротехнике // Вестник Харьковского государственного университета. - 2004. - №16. - С. 25-28.

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
						70
Взм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1) Гришин А.М., Молокова С.В., Руденко М.Г., Щербаков И.С. Экспериментальное исследование нового метода создания опорных полос с использованием струи переохлажденного водяного пара // Экологические системы и приборы. М.: Научтехиздат. 2008. №5. С.34-41.

2) Кавитация и кавитационные течения, сб. «Труды ЦНИ им. Крылова» ред.Матвеев Г. А., Л., 1970.

3) Лемекин Н. Кавитация: теория и применение. М. :Русаки, 2000 - 248с.

4) Рождественский В.В. Кавитация. Л.: Судостроение, 1977 - 240 с.

5) Федоткин И. М., Гулый И. С. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности (теория, расчёты и конструкции кавитационных аппаратов). Ч.1. - К.: Полиграфкнига, 1997. - 940 с.

6) Высокоэффективные лопастные насосные агрегаты для ГТД гражданской авиации / Ф. В. Петров, В. Буковский, М. Гласс [и др.]. // Двигатель. – 2011. – №5 (17) – С. 10–13.

7) Калнин, В. М. Динамика кавитации центробежных насосов ЖРД / В. М. Калнин, В. А. Шерстянников // Двигатель – 2002. – №3 (21). – С. 38–41.

8) Franc, J.P. Fundamentals of Cavitation [Text] / J. P. Franc, J. M. Michel. – Kluver Academic Publishers. – 2010. – 328 P.

9) Григорьев, Ю. Е. Влияние термодинамического эффекта кавитации на некоторые параметры кавитационного течения жидкости в насосах/ Ю.Е. Григорьев, Н.Л. Дорош // Гидрогазодина- 126 мика технических систем : сб. науч. тр. – Киев: Наукова думка, 1985. – С. 31–34.

10) Абрамовских А.А., Голованов А.Н. Об испарении свободной и связанной влаги в лесных горючих материалах // Экологические системы и приборы. М.: Научтехиздат. 2008. № 4. С. 25-32.

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		71

11) Авксентюк Б.П., Овчинников В.В. Исследование формы паровой полости при взрывном кипении // Теплофизика и аэромеханика. 2004. № 4. Т.П. С. 625-635.

12) Архипов В. А., Березиков А.П., Шереметьева У.М. Моделирование распространения аэрозольного облака при выбросе жидких ракетных топлив в атмосферу // Оптика атмосферы и океана. 2004. №5-6. Т. 17. С. 488-493.

13) Архипов В.А., Васенин И.М., Шереметьева У.М. Режимы деформации и дробления жидко-капельных аэрозолей // Аэрозоли Сибири. Рабочая группа: тезисы докладов. Томск: Институт оптики атмосферы СО РАН, 2005. С. 34.

14) Бородин С.А. Исследование процесса растекания капель жидкости, наносимой на поверхность подложки // Коллоидный журнал. 2003. №45. С. 156-158.

15) Гришин А. М., Матвиенко О. В., Руди Ю. А. Численное исследование турбулентного теплообмена в тепловых смерчах / Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф: материалы VII Междунар. конф. Томск. 2008. С. 40.

16) Донцов В.Е., Накоряков В.Е. Волны давления в газожидкостной среде с расслоенной структурой жидкость пузырьковая смесь // ЖПМТФ. 2003. № 4. Т. 44. С. 102- 108.

17) Кавитатор для тепловыделения в жидкости. Патент на изобретение № 2659537 (авторы: А.П. Левцев, А.Н. Макеев, С.Ф. Кудашев). Зарегистрировано в Государственном реестре Российской Федерации 23 апреля 2016.

18) Зубрилов С.П., Селиверстов В.М., Браславский М.И. Повышение эффективности использования топлива путем его кавитационной обработки / Повышение технического уровня и качества судов речного флота // Сб. науч. тр. Вып. 75. Л.: ЛИВТ. С. 20-22.

19) Левцев А.П. Импульсные системы тепло-, водоснабжения сельскохозяйственных объектов / А.П. Левцев, А.Н. Макеев, С.Ф. Кудашев /

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

Российский государственный аграрный университет МСХА им. Тимирязева.
Москва. 2010. 77-81 с.

20) Левцев А.П. Энергетическая цепь в импульсной системе теплоснабжения. ОАО «Типография «Рузаевский печатник», 2016. 503-511 с.

21) Фурсов, В. К. Центробежные насосы. Конструкция и расчет : учеб.пособие / В. К. Фурсов, Г. Я. Фурсова. - Комсомолск-на-Амуре :ГОУВПО «КНАГТУ», 2005. - 78 с.

22) Фурсов, В. К. Прочность деталей центробежных насосов :учеб. пособие / В. К. Фурсов, Г. Я. Фурсова. - Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КНАГТУ», 2007. - 54 с.

23) Ударный узел. Патент на изобретение № 2558740 (авторы:А.П. Левцев, А.Н. Макеев). Зарегистрировано в Государственном реестре Российской Федерации 25 февраля 2014.

24) Трубопроводная арматура с автоматическим управлением: Справочник/Д. Ф. Гуревич, О. Н. Заринский, С. И. Косых и др.; Под общ.ред. С. И. Косых. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. — 320 с, ил.

25) Аш Ж. и соавторы. Датчики измерительных систем: В 2-х книгах. Кн. 1. Пер. с франц. - М.: Мир, 1992. - 280 е., ил.

26) Жадобин Н.Е. Магнитоупругие датчики механических напряжений с применением датчиков Холла / Н.Е. Жадобин, А.Г. Трушин / Государственный морской университет им. Адмирала Ф.Ф. Ушакова. Новоросийск. 2006. 57 – 61 с.

27) Каталог электронных компонентов фирмы AnalogDevices (www.analog.com).

28) Каталог электронных компонентов фирмы LinearTechnology (www.linear.com).

29) Цилькер Б. Я., Орлов С.А. Организация ЭВМ и систем. СПб.: Питер, 2006. - 668 с.

30) Гук М., Юров В. Процессоры Pentium 4, Athlon и Duron. - СПб.: Питер, 2002. - 512 с.

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		73

31) Бутузов В.А. Повышение эффективности систем теплоснабжения на основе возобновляемых источников энергии : Диссертация на соискание ученой 127 степени д-ра техн. наук : Краснодар, – 2004. – 297 с.

32) Волков, Э.П. Проблемы и перспективы развития электроэнергетики России / Э.П. Волков, В.А. Баринов, А.С. Маневич // М.: Энергоатомиздат, 2001.

33) Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

					МД-02069964-13.04.01-07-18	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		74