

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИТ СО РАН)



Щепихин Игорь Владимирович

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Об основных результатах подготовленной научно-квалификационной
работы (диссертации)

«Развитие емкостных методов измерения пространственного положения
элементов энергетических установок»

Направление подготовки:

12.06.01 – Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические
системы и технологии

Специальность подготовки:

05.11.16 – информационно-измерительные и управляющие системы

Научный руководитель

д.т.н., профессор

Меледин В.Г.

Новосибирск 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Теоретическое обоснование использования емкостного метода и конструкция емкостного датчика	8
1.1. Обзор методов измерения малых перемещений в приложении измерения перемещений имитатора ТВЭЛ	8
1.2 Теоретическое обоснование	12
1.3 Конструкция датчика	16
1.4 Определение координат центра имитатора ТВЭЛ методом триангуляции	19
1.5 Выводы по главе 1	21
Глава 2. Калибровка емкостного датчика.....	22
2.1 Описание калибровочного стенда	22
2.2 Данные калибровки.....	23
2.3 Оценка погрешности.....	26
2.4 Выводы по главе 2.....	28
Глава 3. Проведение экспериментальных исследований и анализ полученных данных	29
3.1 Описание экспериментальной установки	29
3.2 Проведение эксперимента, режимы работы.....	32
3.3 Анализ полученных данных.....	37
3.4 Выводы по главе 3	37
Выводы по работе.....	38
Литература	39
Приложение 1. Экспериментальные данные.....	43
Приложение 2. Вычисление координат точек пересечения двух окружностей	47

Введение

Актуальность

Энергетика оказывает огромное влияние на нашу жизнь. Наша цивилизация стремительно развивается. Любое развитие требует в первую очередь энергетических затрат и современных методов диагностики [1, 2, 3]. Последние тенденции показывают, что в настоящее время активно увеличивается доля использования возобновляемых источников энергии. В то же время не прекращается активное развитие атомной энергетики, так как атомная энергия остается одним из надежнейших источников энергии и не зависит от внешних факторов как возобновляемые источники энергии. Обеспечение надежности [4, 5, 6, 7] становится одной из важнейших задач атомной энергетики.

Россия является мировым лидером по экспорту атомных реакторов. На данный момент Россия имеет обширные планы по развитию атомной энергетики как внутри страны, так и за рубежом. В ближайшие 20 лет планируется построить 26 энергетических реакторов на территории страны и примерно столько же за рубежом [8]. По данным Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), на 2019 год насчитывалось 449 действующих ядерных энергетических (то есть производящих утилизируемую электрическую и/или тепловую энергию) реакторов в 34 странах мира и 54 реактора строились на середину 2019 года [9].

Роль атомной энергетики в текущий момент и в будущем невозможно переоценить. В связи с этим очень важно продолжать развитие ядерных технологий, повышать безопасность атомных реакторов. Одним из перспективных направлений развития атомной энергетики являются реакторы с жидкометаллическим теплоносителем (ЖМТ). Эти реакторы компактны, имеют малый вес, самопроизвольно уменьшают мощность при аварийных ситуациях. Развитие атомной энергетики возможно только при соблюдении жестких требований по безопасности. Одним из негативных факторов, влияющих на

надежность энергетических установок, является вибрация. Самым уязвимым местом, где возникает вибрация, являются сборки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), обтекаемые потоком теплоносителя. Высокая плотность жидкометаллического теплоносителя усугубляет эту проблему. В связи с этим необходимо производить подробное исследование данной проблемы с помощью численных и экспериментальных методов. Решение связанной трехмерной задачи гидродинамики и динамики конструкции является одним из приоритетных направлений исследований.

Важным этапом решения связанной задачи является этап валидации результатов численного расчета по надежным экспериментальным данным. Для получения таких данных широко используется ряд бесконтактных оптических методов.

Метод прямой съемки позволяет снять на видеокамеру перемещение имитатора ТВЭЛ, установленного на экспериментальной установке, и на основании полученных видеоданных определить параметры вибрации. Также в имитаторе ТВЭЛ можно разместить датчик ускорения, и с его помощью получить необходимые данные.

Но все эти методы не применимы при использовании жидкометаллического теплоносителя. Оптические методы не могут быть использованы, так как теплоноситель непрозрачен, а размещение электронных датчиков внутри имитатора ТВЭЛ невозможно в связи с высокой температурой. Принимая во внимание вышесказанное, было необходимо разработать новый метод для измерения вибраций или адаптировать уже существующий.

Для решения этой задачи хорошо подходит емкостной метод измерения перемещений, однако выпускаемые промышленностью емкостные датчики перемещений не удовлетворяют ряду требований, предъявляемых в данных экспериментах. Таковыми являются высокая температура эксплуатации (вплоть до +160 °С) и малые габаритные размеры (менее 10 мм). Анализ номенклатуры

емкостных датчиков показал, что промышленность не выпускает емкостных датчиков, которые бы удовлетворяли поставленным требованиям.

Цель работы: разработка бесконтактного метода измерения перемещений модельных элементов ТВС (тепловыделяющая сборка), вызванных обтекающим потоком теплоносителя. Проведение измерений вибрационных характеристик имитатора тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ) реакторной установки при обтекании различными теплоносителями.

Задачи исследований:

1. разработка и реализация емкостного датчика измерения перемещений модельных элементов ТВС (тепловыделяющая сборка) в потоке теплоносителя;
2. проведение измерений вибраций имитатора ТВЭЛ в разных условиях:
 - при обтекании водой и при обтекании жидкометаллическим теплоносителем;
 - при различных скоростях обтекания теплоносителем;
 - при различных методах закрепления;
 - при разной длине имитатора ТВЭЛ.

Научная новизна:

1. Емкостной высокоразрешающий дифференциальный квадратурный многоярусный метод измерения перемещений впервые применен для измерения мод вибраций корпуса сборки тепловыделяющих элементов в потоке теплоносителя энергетического реактора.
2. Впервые предложена двуканальная структура датчика, содержащая высокотемпературную и низкотемпературную части. Конструкция высокотемпературной обеспечивает квадратурные измерения координат смещения корпуса сборки ТВЭЛ на многих ярусах и функционирует при высокой температуре жидкометаллического теплоносителя.

3. Предложена и разработана методика калибровки емкостного двухкоординатного канала датчика перемещений.
4. Впервые получены экспериментальные данные о характере вибраций имитатора ТВЭЛ при обтекании жидкометаллическим теплоносителем.

В работе использованы методы емкостного измерения перемещений, анемометрии по изображениям частиц (PIV), лазерной доплеровской анемометрии, триангуляции, аналитической геометрии, математической статистики.

Практическая ценность результатов. Разработанный метод может использоваться для определения пространственного положения проточных элементов атомных энергетических установок. Полученные данные по вибрации имитатора ТВЭЛ позволяют проводить верификацию расчетных кодов, предназначенных для моделирования вибраций, возникающих в тепловыделяющей сборке. Разработан и практически реализован высокотемпературный двухкоординатный емкостной датчик перемещения. Результаты, изложенные в диссертации, использованы для исследования вибраций возникающих при продольном обтекании имитатора ТВЭЛ теплоносителем на основе воды и жидкометаллического теплоносителя.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждена практическим применением разработанного метода, результатами испытаний, проведенных другими методами.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Емкостной высокоразрешающий дифференциальный квадратурный многоярусный метод измерения пространственного положения имитатора тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ).
2. Результаты экспериментальных измерений вибраций ТВЭЛ, вызванных продольным потоком теплоносителя в кольцевом канале.

Личное участие автора заключается в получении результатов, изложенных в диссертации. Постановка задачи, способ решения и полученные при этом основные научные результаты принадлежат автору. Экспериментальная работа на установках выполнялась сотрудниками научного коллектива при непосредственном участии автора. Представление совместных материалов согласовано с соавторами.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались и представлялись на 18th International Conference of Young Specialists on Micro /Nanotechnologies and Electron Devices (June 29 - July 3, 2017); IV Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (15-22 сентября 2019, Ялта); Всероссийская научная конференция с международным участием. «Семинар вузов по теплофизике и энергетике» (21-23 октября 2019 года, Санкт-Петербург); XIX Всероссийская школа-семинар «Современные проблемы аэрогидродинамики» (Сочи «Буревестник» МГУ, 5-15 сентября 2019 г); на других научных семинарах и совещаниях.

Публикации

Соискателем лично и в соавторстве опубликовано 14 печатных работы, из них по материалам работы 5, из которых 1 издана в изданиях рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 4 - в журналах с индексом SCOPUS, получено решение о выдачи 2 патентов РФ на изобретение.

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, 3-х глав и содержит 49 страниц, 10 рисунков и 11 таблицу. Список литературы включает 27 наименований.

Содержание работы

Первая глава содержит обзор различных датчиков перемещения, теоретическое обоснование использования емкостного метода, описание конструкции емкостного датчика.

Во второй главе описывается калибровочный стенд, процедура калибровки емкостного датчика, приводятся полученные данные.

В третьей главе описывается устройство экспериментальной установки для исследования вибраций имитатора ТВЭЛ в потоке теплоносителя. Приводятся полученные данные и зависимости, анализ данных.

В приложении приводятся расширенные экспериментальные данные, полученные при различных режимах обтекания имитатора ТВЭЛ.

Глава 1. Теоретическое обоснование использования емкостного метода и конструкция емкостного датчика

1.1. Обзор методов измерения малых перемещений в приложении измерения перемещений имитатора ТВЭЛ

Для решения задачи определения пространственного положения элемента конструкции энергетической установки требуется соответствующий датчик перемещения. Элементом энергетической установки, перемещение которого необходимо измерить в нашем случае, является имитатор тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ). Имитатор представляет собой металлическую трубку длиной 1 метр с внешним диаметром 12 мм, внутренним диаметром 10 мм и толщиной стенки 1 мм. Трубка с одной стороны заглушена металлической пробкой, второй конец трубки остается открытым и доступным для размещения датчиков. Предполагаемое отклонение имитатора от оси 1 мм. Так как имитатор ТВЭЛ с внешней стороны обтекается потоком теплоносителя, датчик размещен внутри имитатора ТВЭЛ. Для измерения перемещения имитатора ТВЭЛ датчик должен

быть неподвижен относительно экспериментального стенда и не касаться внутренних стенок имитатора ТВЭЛ.

Схема стенда и имитатора ТВЭЛ приведены в главе 3. Максимальный поперечный размер датчика должен быть не более 7 мм, что обеспечит отклонение имитатора ТВЭЛ на 1 мм, при этом между стенкой имитатора и датчиком останется зазор 0.5 мм.

Должны быть выполнены следующие условия:

- 1) Так как имитатор ТВЭЛ обтекается разными типами теплоносителя, один из которых - жидкий металл, датчик должен функционировать при температуре до 150 °С.
- 2) Датчик необходимо разместить внутри имитатора ТВЭЛ не касаясь стенок имитатора. Датчик должен иметь размер не более 7 мм в поперечном сечении.
- 3) Датчик должен обеспечить измерение положения имитатора ТВЭЛ в двух координатах.
- 4) Датчик должен быть бесконтактным.
- 5) Датчик должен обеспечить регистрацию колебаний до частоты 500 Гц.
- 6) Требуется пространственное разрешение не хуже 0.1 мм.

На сегодняшний день существует множество датчиков перемещения, которые можно разделить по принципу действия [10]:

- 1) емкостные,
- 2) оптические,
- 3) индуктивные,
- 4) вихретоковые,
- 5) ультразвуковые,
- 6) магниторезистивные,
- 7) потенциометрические,
- 8) на основе эффекта Холла.

Емкостные датчики перемещения

В основе работы датчиков этого типа лежит изменение емкости конденсатора при изменении его геометрической конфигурации. В простейшем случае, емкость конденсатора обратно пропорциональна расстоянию между обкладками. Измеряя емкость конденсатора при прочих известных параметрах можно судить о расстоянии между обкладками. Чувствительность подобного метода достаточно высока. Возможна миниатюрная конструкция.

Оптические датчики перемещения

Существует множество оптических схем датчиков перемещения, базирующихся на различных оптических эффектах. Наиболее популярной является схема оптической триангуляции. Фиксируя рассеянное поверхностью объекта излучение и определяя угол отражения, можно определить расстояние до объекта. Есть другой метод: фиксируя положение изображения объекта на матрице фотокамеры в различные моменты времени и зная масштаб пикселя (один чувствительный элемент матрицы) можно определить поперечное смещение объекта. Достоинством оптического метода является возможность производить измерения бесконтактным способом, недостатком сложность и громоздкость конструкции. Данный метод невозможно использовать, если объект находится за непрозрачной преградой.

Индуктивные датчики перемещения

В данном методе используется изменение индуктивности в трансформаторе с подвижным сердечником. Перемещение объекта измерения приводит к перемещению сердечника, что вызывает изменение потокосцепления между первичной и вторичной обмоткой трансформатора[11]. К недостаткам данного метода можно отнести громоздкость конструкции.

Вихретоковые датчики перемещения

Датчики данного типа содержит генератор магнитного поля и регистратор, с помощью которого определяется величина индукции вторичных магнитных полей [12]. Недостатки метода связаны с чувствительностью к внешним электромагнитным полям и сложность калибровок.

Ультразвуковые датчики перемещения

Эти датчики построены по принципу радара: фиксируя время между отправленной и пришедшей ультразвуковой волной, можно определить расстояние до объекта. Метод позволяет определять расстояние до объекта с точностью до десятых долей миллиметра.

Магниторезистивные датчики перемещения

В магниторезистивных датчиках перемещения используется зависимость электрического сопротивления магниторезистивных пластинок от направления и величины индукции внешнего магнитного поля [12]. К достоинствам данных датчиков можно отнести малые габаритные размеры.

Датчики на основе эффекта Холла

В основу этих датчиков положен эффект Холла: прохождение тока через проводник, на который воздействует внешнее магнитное поле, приводит к возникновению разности потенциалов в поперечном сечении проводника.

Магнитострикционные датчики перемещения

Как правило, магнитострикционный датчик представляет собой протяженный канал – волновод, вдоль которого перемещается постоянный кольцевой магнит. Внутри волновода содержится проводник, способный при подаче на него электрических импульсов создавать магнитное поле вдоль всей своей длины. Магнитное поле постоянного магнита, складываясь с магнитным полем волновода, создает момент вращения волновода. Импульс вращения

распространяется по волноводу со скоростью звука. Регистрируя время задержки между импульсом тока и приемом импульса вращения, можно рассчитать расстояние до кольцевого магнита. К достоинствам данного метода можно отнести устойчивость к неблагоприятным условиям, отличную повторяемость, низкую чувствительность к температурным изменениям [13], к недостаткам - большие габаритные размеры.

Потенциометрические датчики перемещения

В основе данного типа датчиков лежит потенциометр. Линейное перемещение приводит к изменению сопротивления потенциометра. Если через потенциометр пропускать электрический ток, то падение напряжения на нем будет пропорционально величине сопротивления и, следовательно, величине линейного перемещения [14]. Данный метод обладает низкой чувствительностью.

Вывод

Принимая во внимание ограничения, налагаемые поставленной задачей, из всех рассмотренных типов датчиков лучше всего подходят емкостные датчики.

1.2 Теоретическое обоснование

В простейшем случае емкостной преобразователь представляет плоский конденсатор, где в результате перемещения изменяется либо площадь перекрытия электродов, либо зазор между ними. Емкость плоского конденсатора записывается следующим образом:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} \quad (1),$$

где S – площадь электродов, d – зазор между ними, ε - относительная диэлектрическая проницаемость среды между электродами - обкладками, ε_0 - электрическая постоянная ($\approx 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф м⁻¹).

Существует два вида зависимости емкости от перемещения [15]. Первый из них соответствует изменению площади или эффективной проницаемости, второй – изменению зазора. Нашему случаю соответствует случай с изменением зазора. Зависимость емкости от перемещения записывается следующим образом:

$$C = C_0 / (1 + x/d) \quad (2),$$

где d – начальный зазор между электродами, x – изменение зазора.

Если разместить один электрод конденсатора внутри имитатора ТВЭЛ неподвижно относительно экспериментальной установки, другим электродом сделать сам имитатор ТВЭЛ, то мы получим конденсатор переменной емкости, которая зависит от смещения имитатора ТВЭЛ относительно неподвижного электрода.

Включив данный конденсатор в схему (см. рис 1.1) емкостного делителя, на выходе мы получим амплитудно-модулированный сигнал с несущей частотой равной частоте генератора $V1$. Модулирующий сигнал будет пропорционален смещению имитатора ТВЭЛ относительно неподвижного электрода.

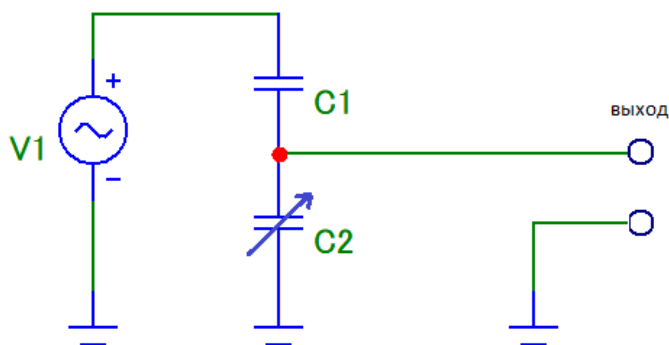


Рисунок 1.1. $C1$ – постоянный конденсатор, $C2$ – переменный конденсатор, образованный неподвижным электродом и подвижным имитатором ТВЭЛ.

Найдем напряжение на выходе емкостного делителя. Для этого запишем импеданс для $C1$ и $C2$:

$$Z_{c1} = 1/(2\pi f C1),$$

$$Z_{c2} = 1/(2\pi f C2),$$

где f – частота генератора.

Общий импеданс:

$$Z_{\text{общ}} = Z_{c1} + Z_{c2}$$

Следовательно, напряжение на выходе можно записать как:

$$U_{\text{вых}} = (U_{\text{вх}} / Z_{\text{общ}}) Z_{c2} = U_{\text{вх}} Z_{c2} / (Z_{c1} + Z_{c2}) = U_{\text{вх}} C1 / (C1 + C2) \quad (3),$$

где $U_{\text{вх}}$ – это амплитуда сигнала генератора, $U_{\text{вых}}$ – амплитуда сигнала на выходе емкостного делителя.

Оценим $U_{\text{вых}}$ при максимальном и минимальном значении $C2$. Для этого оценим $C1$ и $C2$, зная геометрию имитатора ТВЭЛ и конструкцию датчика (будет описана далее).

Вычислим емкость постоянного конденсатора $C1$, приняв коэффициент относительной диэлектрической проницаемости материала печатной платы за 4.5, площадь электродов - 25 мм^2 , зазор между электродами - 1 мм. Подставив эти данные в уравнение 1, получаем

$$C1 \approx 1 \text{ пФ}$$

Оценку величины переменной емкости можно выполнить по формуле для цилиндрического конденсатора [16].

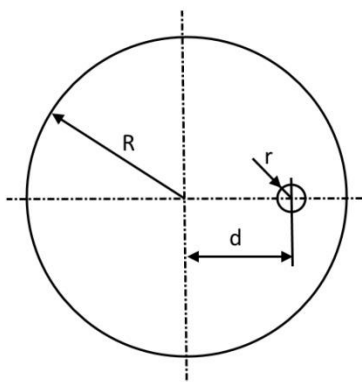


Рисунок 1.2. Цилиндрический конденсатор.

$$C = \frac{2\pi\varepsilon}{\text{Arch} \frac{R^2 + r^2 - d^2}{2Rr}} \quad (4)$$

где Arch – обратный гиперболический косинус

Приняв $R = 5$ мм и $r = 0.5$ мм, вычислим емкость C_2 для различных значений d , учитывая, что длина конденсатора 25 мм. C_2 для минимального и максимального зазора между неподвижным электродом и имитатором ТВЭЛ составляет:

$$\text{при } d = 4.4 \text{ мм } C_2 \approx 2.4 \text{ пФ,}$$

$$\text{при } d = 3.4 \text{ мм } C_2 \approx 0.7 \text{ пФ.}$$

Подставив полученные значения C_1 и C_2 в уравнение (3) получаем:

$$U_{\text{вых}}(4.4 \text{ мм}) = U_{\text{вх}} * 1/(1+2.4) \approx 0.3 U_{\text{вх}},$$

$$U_{\text{вых}}(3.4 \text{ мм}) = U_{\text{вх}} * 1/(1+0.7) \approx 0.6 U_{\text{вх}}$$

Видно, что при выбранной конфигурации датчика сигнал на выходе емкостного делителя изменяется от $0.3U_{\text{вх}}$ до $0.6U_{\text{вх}}$. Эти величины детектируемы с помощью различных современных АЦП (аналого-цифровой преобразователь).

1.3 Конструкция датчика

Датчик состоит из двух печатных плат, соединенных между собой металлическими стойками. Плата имеет габариты 5x1x100 мм и изготовлена из стеклотекстолита. С каждой длинной стороны платы расположено по два электрода: один электрод расположен с верхней стороны платы, другой - с нижней.

На рисунке 1.3 электроды выделены коричневым цветом. Каждый электрод представляет собой прямоугольник медной фольги, размер электрода 25x1 мм, толщина медной фольги 35 мкм. Электроды изготовлены методом химического травления. Собранные вместе платы образуют датчик с четырьмя сенсорами, габариты датчика составляют 5x5x100 мм.

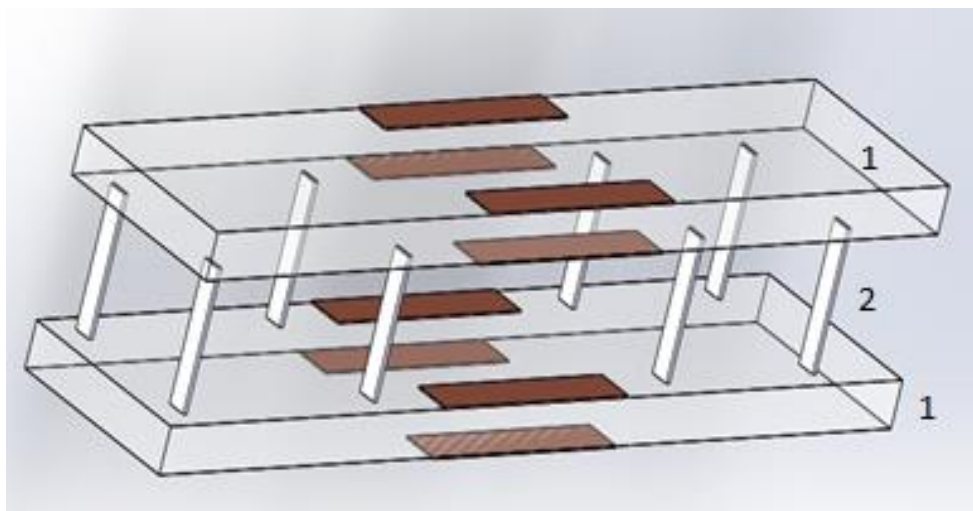


Рисунок 1.3. Конструкция емкостного датчика. 1 – печатные платы, 2 - металлические стойки.

На рисунке 1.4 изображен поперечный разрез датчика, расположенного внутри имитатора ТВЭЛ.

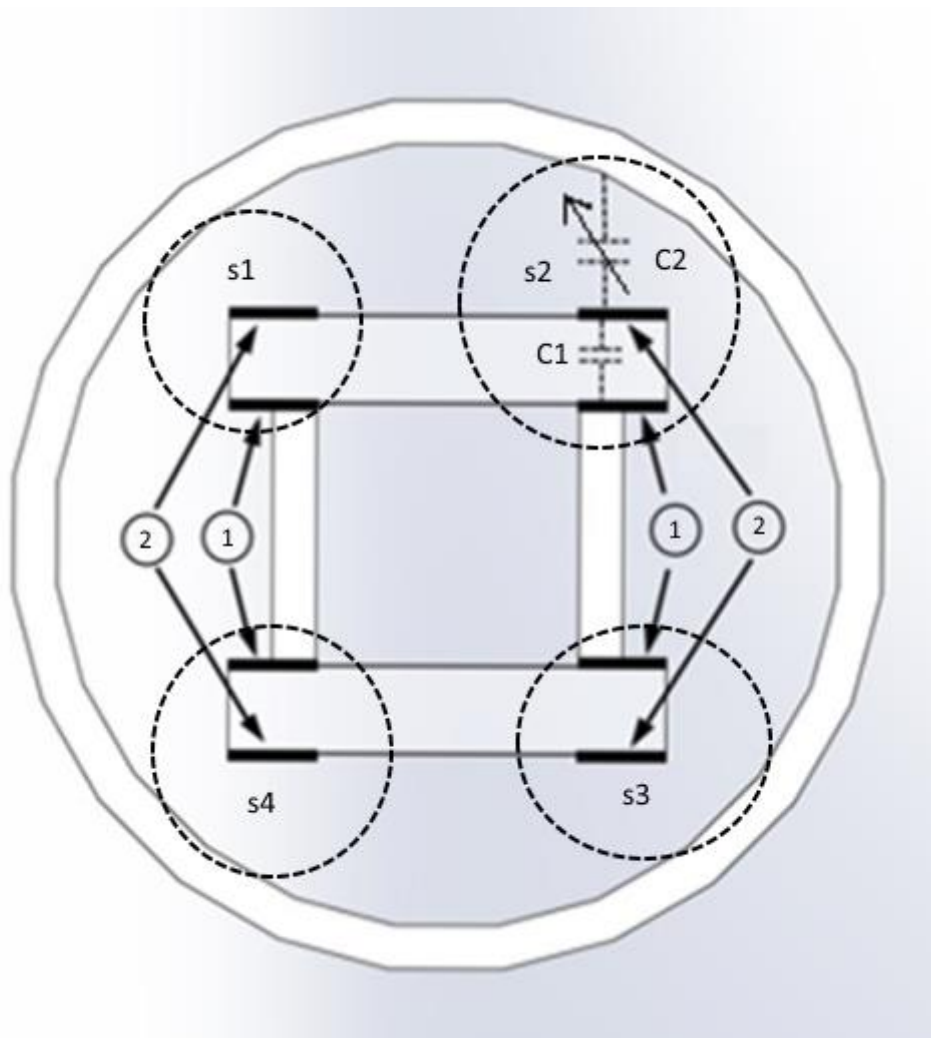


Рисунок 1.4. Имитатор ТВЭЛ и емкостной датчик в разрезе, вид сверху.

1 - первая обкладка постоянного конденсатора C1, 2 – вторая обкладка постоянного конденсатора C1 и первая обкладка переменного конденсатора C2.

s1÷s4 – емкостные сенсоры.

Как показано на рисунке 1.4, по углам датчика расположены четыре идентичных емкостных сенсора, схема одного изображена на рисунке 1.1. Сенсорам присвоены обозначения s1, s2, s3 и s4.

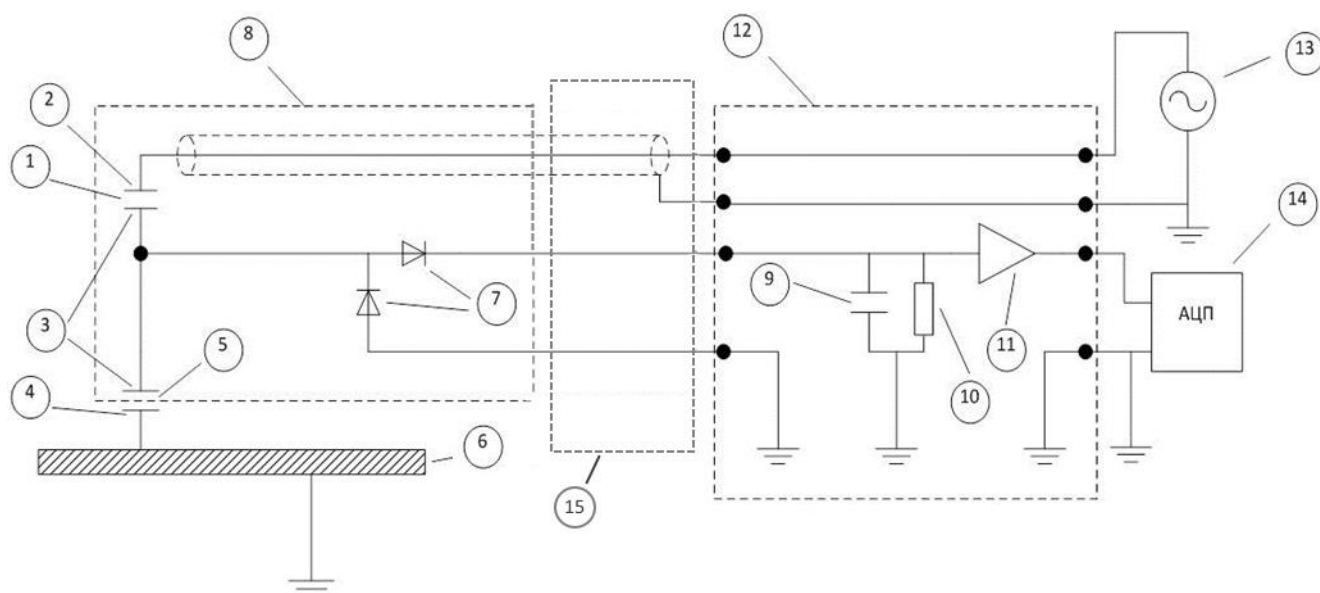


Рисунок 1.5. Структурная схема одного канала датчика и электронного блока.

На рисунке 1.5 представлена структурная схема одного канала датчика и электронного блока. Цифрой 8 обозначен один емкостной сенсор, сенсор состоит из двух конденсаторов и двух детектирующих диодов. Расположение конденсаторов на плате детектора изображено на рисунках 1.3 и 1.4, детектирующие диоды на рисунках 1.3 и 1.4 не изображены. Цифрой 15 обозначена выносная штанга, выносная штанга - это металлическая трубка внешний диаметр которой составляет 6 мм, внутренний диаметр - 4 мм, длина - 1 м. Цифрой 12 обозначен блок электроники, состоящий из 4 идентичных каналов. Для работы блока используется внешнее питание, внешний генератор и внешнее многоканальное АЦП.

Работа схемы. Сигнал с генератора синусоидальных импульсов 13 подается на постоянный конденсатор 1. Сигнал делится на емкостном делителе, образованном конденсатором 1 и 2. С выхода емкостного делителя сигнал поступает на вход амплитудного детектора, состоящего из диодов 7, емкости 9 и резистора 10, где происходит выделение полезного сигнала. Полезный сигнал усиливается усилителем 11. С помощью внешнего АЦП 14 сигнал записывается на компьютер в числовом виде.

Напряжение на выходе усилителя в общем виде можно представить следующим образом:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \frac{C_1}{C_1 + C_2(d)} K_{\text{дет}} K_{\text{ус}} \quad (5)$$

где $K_{\text{дет}}$ – коэффициент преобразования амплитудного детектора, $K_{\text{ус}}$ – коэффициент усиления усилителя, d – расстояние от центра имитатора ТВЭЛ до электрода.

Из-за сложной геометрии всей сборки сенсоров точную зависимость $C_2(d)$ мы не знаем, $K_{\text{дет}}$ нам также неизвестен, поэтому запишем $U_{\text{ВЫХ}}$ в общем виде:

$$U_{\text{ВЫХ}} = G(d) \quad (6)$$

Выполнив калибровочные измерения, найдем $G(d)$ экспериментально. Зная экспериментальную $G(d)$, обратную функцию $H(u)$

$$d = H(u) \quad (7),$$

где H – функция преобразования, u – напряжение на выходе усилителя, d – расстояние от неподвижного электрода до центра имитатора ТВЭЛ.

Имея четыре сенсора, с помощью метода триангуляции мы можем вычислить положение центра имитатора ТВЭЛ относительно емкостного датчика.

1.4 Определение координат центра имитатора ТВЭЛ методом триангуляции

Метод триангуляции широко применяется в научных исследованиях [17, 18, 19]. Так как емкостной датчик состоит из четырех сенсоров, то зная расстояние

между каждым сенсором и центром имитатора, можно вычислить координаты центра имитатора относительно центра емкостного датчика.

Разобьем сенсоры на две пары так, чтобы сенсоры из одной пары находились по диагонали друг к другу. Первую пару представляют сенсоры s_1 и s_3 , вторую - s_2 и s_4 . Для пары s_1 - s_3 построим окружности с радиусами r_1 и r_3 соответственно. Точки пересечения, обозначенные на рисунке 1.6 буквами a и b и выделенные красным цветом, дадут положение центра имитатора. Прделав такую же процедуру для пары s_2 - s_4 , найдем точки c и d , процедура нахождения точек пересечения двух окружностей описана в приложении 2. Диагональ s_1s_3 , выделенная на рисунке красным цветом, делит плоскость на две полуплоскости. Определив, какой полуплоскости принадлежат точки c и d , мы определяем нужную нам точку a или b (в нашем случае точку b). Таким же образом мы выбираем и одну из точек c или d (в нашем случае точку d).

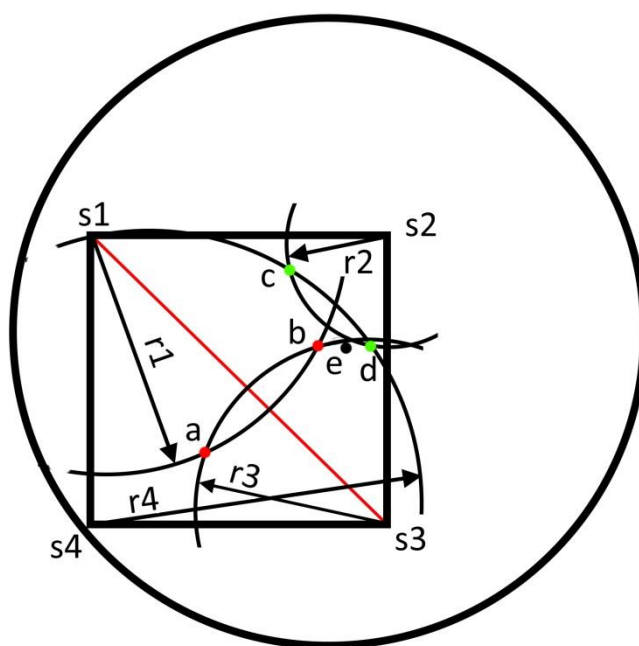


Рисунок 1.6. Точки пересечения окружностей.

Определив две нужные точки, вычисляем координаты точки e ; точка e – это середина отрезка bd , координаты точки e и будут искомыми координатами центра имитатора ТВЭЛ.

При таком алгоритме вычислений возникает несколько особых случаев. Обозначим за R расстояние от одного из сенсоров до центра датчика (черного квадрата на рисунке).

- Случай $r_1+r_3 \leq R$, окружности не пересекаются или касаются в одной точке. Вместо двух точек a, b мы находим одну точку a , которая принадлежит отрезку s_1s_3 , при этом $\frac{s_1a}{s_3a} = \frac{r_1}{r_3}$. Центр имитатора лежит в середине отрезка между точкой a и ближайшей точкой из пары c, d . Точно также поступаем и в случае, если $r_2+r_4 \leq R$.
- Случай $r_1+r_3 \leq R$ и $r_2+r_4 \leq R$. Каждая пара сенсоров дает только одну точку, центр имитатора находится в середине отрезка соединяющего эти точки.
- Случай $r_1 = r_3 > R$ и $r_2 = r_4 > R$. Точки a, b лежат на диагонали s_2s_4 , а точки c, d лежат на диагонали s_1s_3 , центр имитатора совпадает с центром датчика.

1.5 Выводы по главе 1

1. Выполнен обзор датчиков перемещения. Определен наиболее перспективный метод для решения задачи определения пространственного положения имитатора ТВЭЛ.
2. Теоретически обоснована пригодность емкостного метода для измерения пространственного положения имитатора ТВЭЛ, проведена оценка параметров выходных сигналов емкостного датчика.
3. Разработана конструкция и изготовлен емкостной датчик перемещения.
4. Разработан метод определения координат имитатора ТВЭЛ на основе триангуляционного метода.

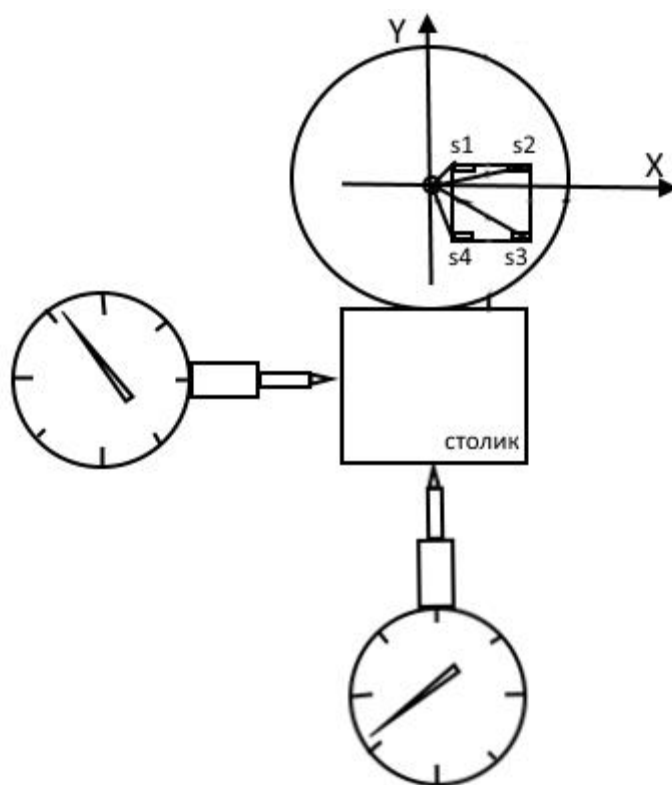
Глава 2. Калибровка емкостного датчика

2.1 Описание калибровочного стенда

Емкостной датчик выполнен на базе современных электронных компонентов, выпускаемых промышленностью. Все электронные компоненты имеют разброс своих характеристик, от которых зависит работа датчика. В связи с этим, характеристика $G(d)$ и обратная характеристика $H(u)$ для каждого сенсора индивидуальна.

Для получения данных характеристик была проведена калибровка. Калибровка проводилась на стенде. Устройство стенда представлено на рисунке 2.1.

Рисунок 2.1. Калибровочный стенд.



Стенд состоял из двухкоординатного столика, оснащенного двумя микрометрами часового типа; цена деления 0.01 мм, погрешность ± 0.01 мм. На столик жестко закреплен отрезок металлической трубки длиной 150 мм с внутренним диаметром 10 мм и толщиной стенки 1 мм; из такой трубки изготовлен

имитатор тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ). Как показано на рисунке, внутри трубки располагается (соосно с отрезком трубки) емкостной датчик, закрепленный независимо от столика за основание стэнда. Система координат XY остается неподвижной относительно основания стэнда. Когда оси X и Y проходят через центр трубки, микрометры показывают 0 мм. Датчик в процессе калибровки остается неподвижным, столик с жесткозакрепленной трубкой перемещается, координаты центра трубки изменяются и измеряются с помощью микрометров. После перемещения трубки в очередную точку калибровки, фиксируются напряжения на сенсорах $s_1 \div s_4$. Измерение напряжений осуществляется с помощью многоканального внешнего АЦП (L-CARD E14-440), его разрядность составляет 14 бит, входной диапазон - ± 10 Вольт, частота дискретизации - 2 кГц, предел допустимой приведенной (к верхнему значению предела измерений) основной погрешности измерений напряжения постоянного тока - $\pm 0.05\%$ (5 мВ для шкалы ± 10 В).

2.2 Данные калибровки

Калибровка была проведена по 82 точкам, координаты некоторых из них совпадают.

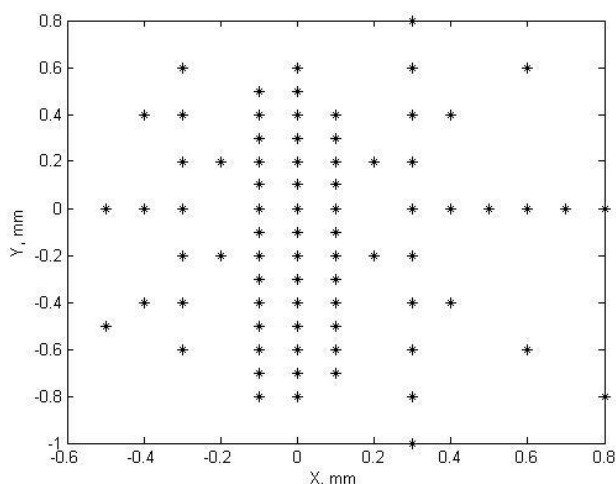


Рисунок 2.2. Калибровочные точки.

На рисунке 2.2 представлен набор калибровочных точек.

В результате проведения калибровки были получены следующие результаты.

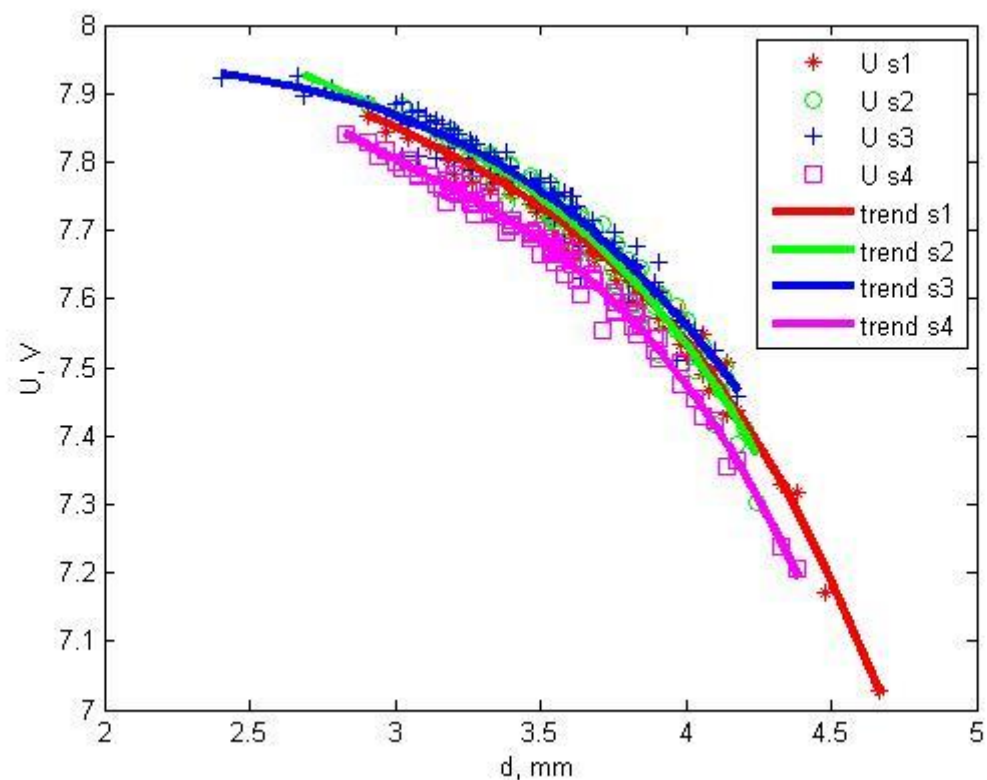


Рисунок 2.3. Экспериментальные данные. Зависимость $U = G(d)$. По оси X отложено расстояние в мм от центра трубки до сенсора, по оси Y – напряжение на сенсорах в вольтах. Данные приведены для четырех сенсоров.

На рисунке 2.3 представлены данные, полученные в результате калибровки. Маркерами разного цвета и формы обозначены данные со всех четырех сенсоров. Сплошными линиями соответствующего цвета представлены аппроксимирующие полиномы третьей степени.

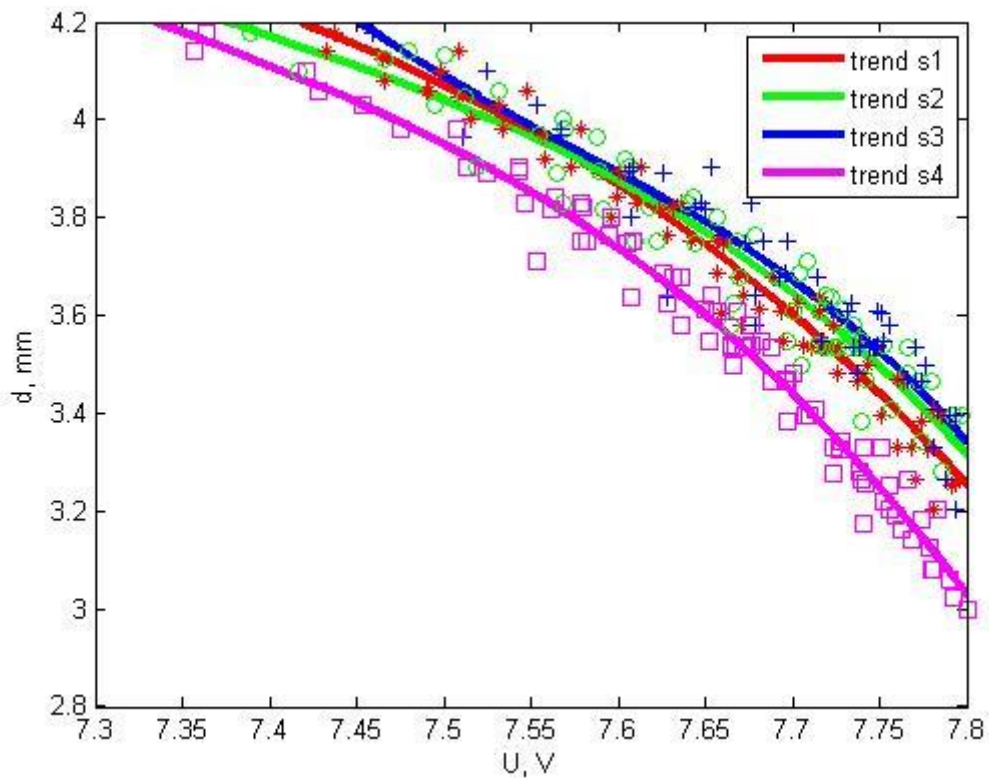


Рисунок 2.4. Калибровочные данные. Зависимость $d = H(U)$ для четырех сенсоров.

На рисунке 2.4 представлена зависимость $d = H(U)$. Данные разных датчиков обозначены маркерами разного цвета и формы. Сплошными линиями отображены соответствующие аппроксимирующие полиномы третьей степени.

Данные аппроксимировались полиномами третьей степени. Для лучшей аппроксимации данные смещены, для этого произведена замена переменных.

$$U_{\text{new}} = U - 7.65$$

$$D_{\text{new}} = d - 3.54$$

Таблица 2.1. Коэффициенты аппроксимирующих полиномов

Номер сенсора	K3	K2	K1	K0	СКО
1	-2.814	-3.627	-2.655	0.204	0.06
2	-4.668	-3.968	-2.301	0.229	0.06
3	-14.187	-3.341	-2.167	0.250	0.08
4	-4.990	-4.949	-2.964	0.061	0.04

В таблице представлены коэффициенты полиномов для $D_{new} = H(U_{new})$.

$$D_{new} = H(U_{new}) = K3 * U_n^3 + K2 * U_n^2 + K1 * U_n + K0$$

Произведя обратные преобразования, получаем:

$$d_j(U_j) = K3_j * (U_j - 7.65)^3 + K2_j * (U_j - 7.65)^2 + K1_j * (U_j - 7.65) + K0_j + 3.54,$$

где j – номер сенсора, U_j – напряжение на сенсоре, $K3_j \div K0_j$ – коэффициенты аппроксимирующего полинома.

2.3 Оценка погрешности

Проведем оценку случайной погрешности. В таблице 2.1 для каждого сенсора приведено значение СКО (среднеквадратическое отклонение). СКО было рассчитано по формуле

$$СКО = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_N (d_n - H(u_n))^2}$$

Из таблицы 2.1 видно, что максимальное СКО было получено для сенсора s3 и составило 0.08 мм, минимальное СКО - для сенсора s4 и составило 0.04. Среднее СКО по четырем сенсорам имеет значение 0.06 мм.

По измеренным значениям r1, r2, r3, r4 вычисляется значение координат x, y центра имитатора ТВЭЛ. Так как система симметрична относительно x и y, можно найти погрешность только для одной координаты и распространить ее на другую. Если поместить центр системы координат в точку, где находится центр сенсора s1, имеет место равенство

$$r1^2 = x^2 + y^2$$

Так как координаты x и y имеют одинаковую погрешность, то для вычисления погрешности предыдущую формулу можно переписать

$$r1^2 \approx 2x^2$$

Или

$$x \approx \frac{r1}{\sqrt{2}} = f(r1)$$

Случайная ошибка косвенных измерений для величины $N = g(x, y, z)$ записывается следующим образом

$$\Delta N = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y} \Delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial z} \Delta z\right)^2}$$

Имеем

$$\Delta x \approx \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \Delta r1$$

Запишем координаты (X, Y) центра имитатора через координаты, полученные с помощью пары сенсоров s1s3 (x1, y1) и пары сенсоров s2s3 (x2, y2).

$$X = (x1+x2)/2, \quad Y = (y1+y2)/2$$

Вычислим ΔX с учетом формулы для случайной ошибки косвенных измерений

$$\Delta X = \frac{\Delta x}{\sqrt{2}}, \quad \Delta Y = \frac{\Delta y}{\sqrt{2}}$$

Найдем численное значение ΔX

$$\Delta X = \pm \frac{\Delta x}{\sqrt{2}} = \pm \frac{\Delta r_1}{\sqrt{2}\sqrt{2}} = \pm \frac{0.06}{2} = \pm 0.03 \text{ мм}$$
$$\Delta Y = \pm 0.03 \text{ мм}$$

Таким образом, случайная погрешность координаты X и Y центра имитатора ТВЭЛ равна ± 0.03 мм.

Оценка систематической погрешности.

Систематическая ошибка косвенных измерений для величины $N = g(x,y,z)$ записывается следующим образом

$$\Delta N = \pm \left(\left| \frac{\partial g}{\partial x} \Delta x \right| + \left| \frac{\partial g}{\partial y} \Delta y \right| + \left| \frac{\partial g}{\partial z} \Delta z \right| \right)$$

Оценка максимальной производной для функции $N(u)$ (см. рис. 2.4) дает значение ≈ 4 мм/вольт. Погрешность измерения u составляет 5 мВ. Запишем систематическую ошибку

$$\Delta r_{\text{сист}} = \pm 4 * 5 * 10^{-3} = \pm 0.02 \text{ мм}$$

Принимая во внимание, что погрешность X прямо пропорциональна погрешности r , будем считать, что $\Delta X_{\text{сист}} \approx \Delta r_{\text{сист}}$.

Полная погрешность вычисляется по формуле

$$\partial X = \pm \sqrt{\Delta X^2 + \Delta X_{\text{сист}}^2} \approx \pm 0.04 \text{ мм}$$

2.4 Выводы по главе 2

1. Разработан калибровочный стенд и методика калибровки емкостного датчика.
2. Проведена калибровка, получены коэффициенты аппроксимирующих полиномов, коэффициенты представлены в таблице 2.1.

3. Проведена оценка погрешности измерений, проводимых с помощью емкостного датчика. Погрешность составила ± 0.04 мм, что удовлетворяет поставленным требованиям.

Глава 3. Проведение экспериментальных исследований и анализ полученных данных

3.1 Описание экспериментальной установки

Целью данного эксперимента является проведение исследования вибрации продольно обтекаемого стержня (имитатора ТВЭЛ) в кольцевом канале, инициированной потоком теплоносителя. Для решения поставленной задачи были разработаны и изготовлены две экспериментальные установки.

Одна экспериментальная установка предназначалась для работы с водой в качестве теплоносителя. Другая экспериментальная установка предназначалась для работы с жидкометаллическим теплоносителем.

Обе экспериментальные установки представляли собой замкнутый гидродинамический контур с рабочим участком в виде кольцевого канала с центральным стержнем и были организованы одинаково; их схема представлена на рисунке 3.1.

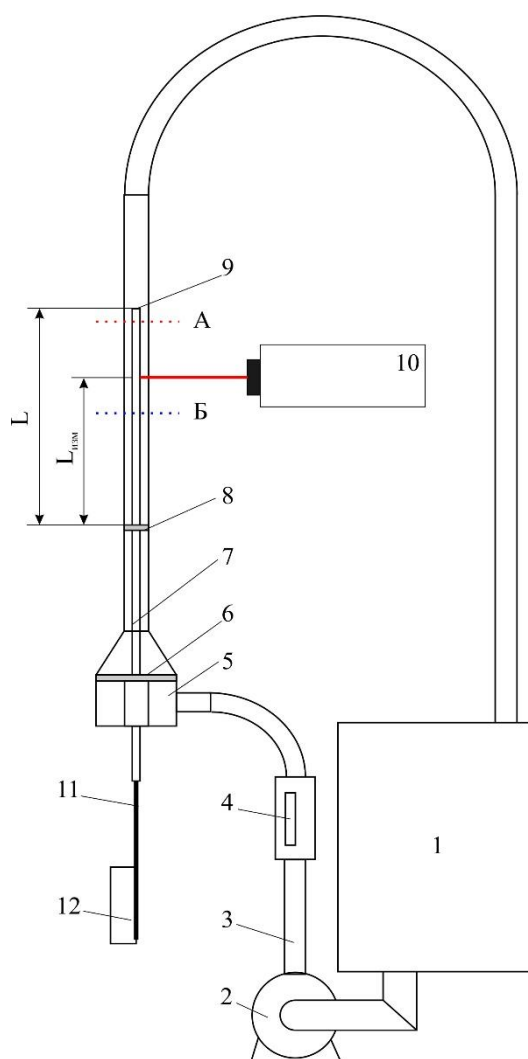


Рисунок 3.1. Схема экспериментальной установки. 1 – бак, 2 – насос, 3 – напорная линия, 4 – расходомер, 5 – входной коллектор, 6 – выравнивающая решетка, 7 – одиночный стержень, 8 – основная решетка, 9 – кончик стержня, 10 – система ЛДИС, 11 – штанга с емкостным датчиком перемещений, 12 – электронная аппаратура.

Гидродинамический контур состоит из системы трубопроводов, рабочего участка, бака 1 с рабочей жидкостью и измерительной аппаратуры (рисунок 3.1). Рабочий теплоноситель, вода или эвтектический сплав свинец-висмут хранился в баке. Бак в установке для жидкометаллического теплоносителя был снабжен двумя системами разогрева: для донной области и внешней стенки. Нагреватели управлялись автономной автоматической системой. В начале проведения экспериментов производился разогрев рабочей жидкости в баке и ее плавление. Основное внимание в контуре было уделено степени однородности нагрева всех конструктивных элементов контура для исключения областей «захолаживания»

при циркуляции в контуре модельного жидкометаллического теплоносителя (ЖМТ). В качестве ЖМТ использовался эвтектический свинцово-висмутовый сплав. Измерения температур элементов стенда производились с помощью термопар типа «К». Для организации течения был использован циркуляционный центробежный насос 2. Насос приводился в движение с помощью двигателя и генератора частоты. Геометрия рабочего участка обеих экспериментальных установок была полностью идентична. Диаметр внешней трубы - 26 мм, диаметр внутренней трубки - 12 мм. Внутренняя трубка (имитатор ТВЭЛ) представляла собой ровную, прямолинейную вертикальную трубку из алюминия с однородной по высоте толщиной материала. Внутренний диаметр трубки - 10 мм, внешний - 12 мм.

3.2 Проведение эксперимента, режимы работы

Проведение измерений на установке с водой в качестве теплоносителя.

В ходе эксперимента изменялись следующие параметры:

1. расход теплоносителя,
2. длина имитатора ТВЭЛ,
3. способ закрепления ТВЭЛ

Расход изменялся в диапазоне от 0.2 до 7.9 тонн/час.

Длина имитатора ТВЭЛ устанавливалась в пяти вариантах: 300, 400, 500, 600, 800 мм.

В качестве способа крепления имитатора ТВЭЛ использовалось консольное или шарнирное крепление.

Полученные данные представлены в виде таблиц, приложение 1.

В таблице 3.1 представлена зависимость максимального (R_{max}) и среднего (R_{mean}) отклонения имитатора ТВЭЛ от центра емкостного датчика в зависимости от расхода теплоносителя. Данные представлены для разных значений L (длина имитатора ТВЭЛ). Теплоноситель: вода. Крепление: консольное.

В таблице 3.2 представлена зависимость отклонения для $L = 400$ мм. Крепление: шарнирное.

Таблица 3.1 Теплоноситель: вода. Закрепление: консольное.

<p>Graph for L = 300. The y-axis is 'отклонение, мм' ranging from -0.10 to 0.30. The x-axis is 'расход, т/час' ranging from 0 to 7. The blue line with diamonds (R max) shows a peak of approximately 0.22 mm at a flow rate of 4 t/h. The red line with squares (R mean) shows a peak of approximately 0.13 mm at 4 t/h.</p>	<p>L = 300</p>
<p>Graph for L = 400. The y-axis is 'отклонение, мм' ranging from -0.10 to 0.30. The x-axis is 'расход, т/час' ranging from 0 to 7. The blue line with diamonds (R max) shows a peak of approximately 0.28 mm at a flow rate of 2.5 t/h. The red line with squares (R mean) shows a peak of approximately 0.17 mm at 2.5 t/h.</p>	<p>L = 400</p>
<p>Graph for L = 500. The y-axis is 'отклонение, мм' ranging from 0.00 to 0.20. The x-axis is 'расход, т/час' ranging from 0 to 7. The blue line with diamonds (R max) shows a peak of approximately 0.17 mm at a flow rate of 6 t/h. The red line with squares (R mean) shows a peak of approximately 0.06 mm at 6 t/h.</p>	<p>L = 500</p>
<p>Graph for L = 600. The y-axis is 'отклонение, мм' ranging from 0.00 to 0.20. The x-axis is 'расход, т/час' ranging from 0 to 7. The blue line with diamonds (R max) shows a peak of approximately 0.18 mm at a flow rate of 6 t/h. The red line with squares (R mean) shows a peak of approximately 0.06 mm at 6 t/h.</p>	<p>L = 600</p>
<p>Graph for L = 800. The y-axis is 'отклонение, мм' ranging from -0.10 to 0.60. The x-axis is 'расход, т/час' ranging from -1 to 9. The blue line with diamonds (R max) shows a peak of approximately 0.55 mm at a flow rate of 8 t/h. The red line with squares (R mean) shows a peak of approximately 0.15 mm at 8 t/h.</p>	<p>L = 800</p>

Таблица 3.2 Теплоноситель: вода. Закрепление: шарнирное.

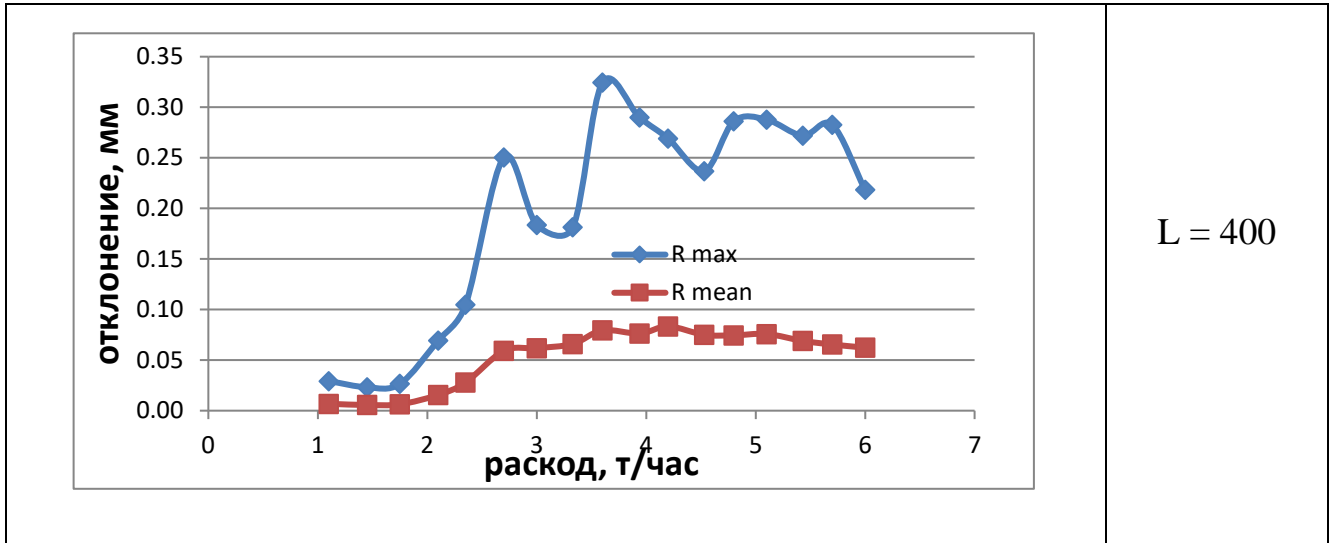


Таблица 3.3 Примеры траекторий движения имитатора ТВЭЛ. Траектории в каждой строке пронумерованы слева на право. Закрепление: консольное.

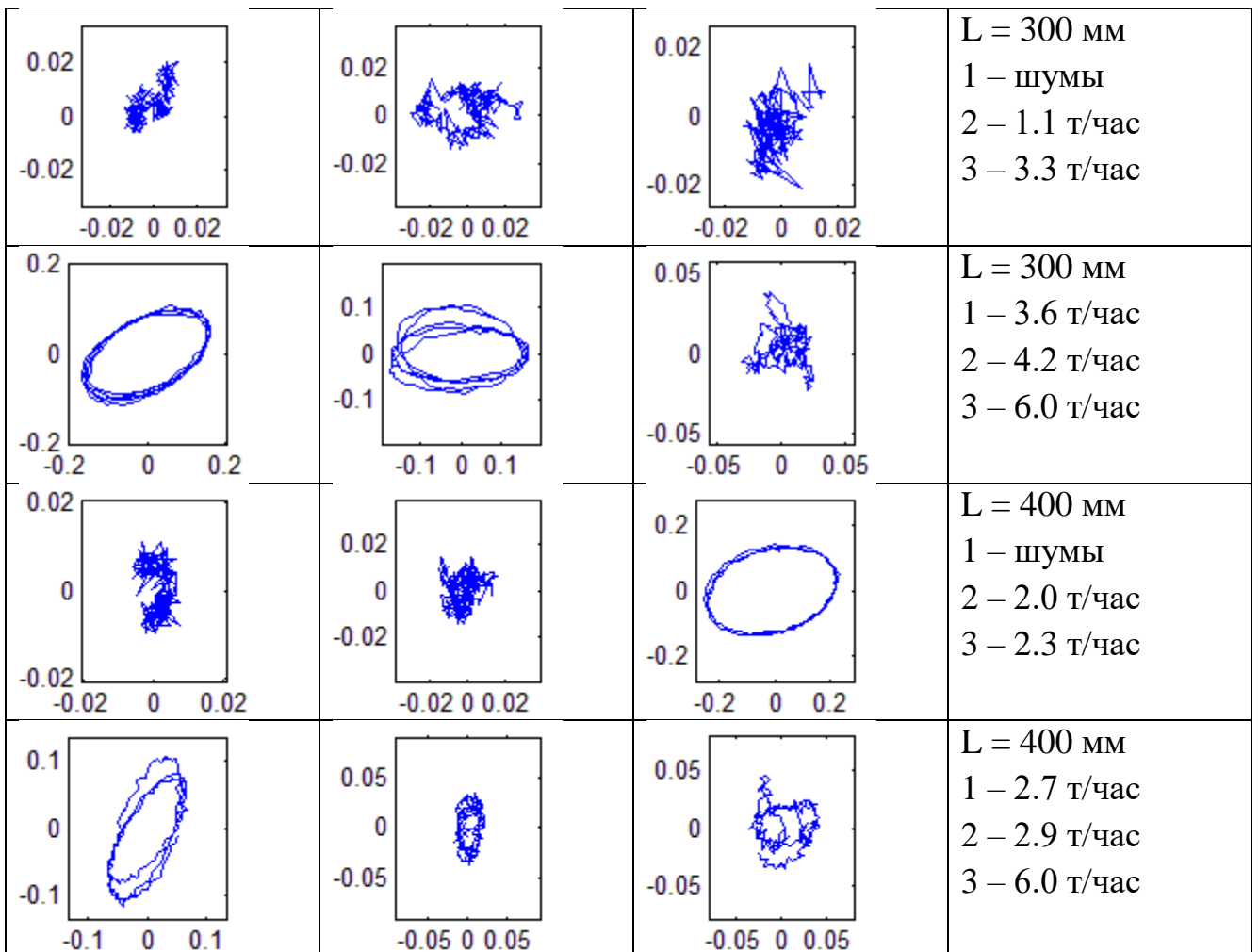
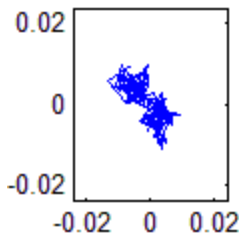
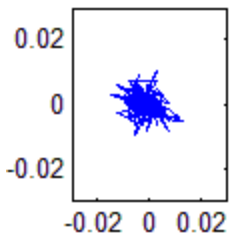
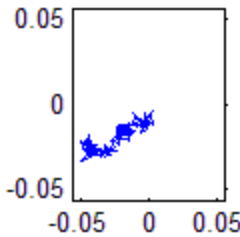
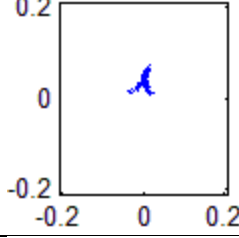
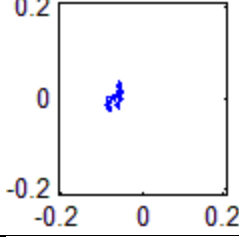
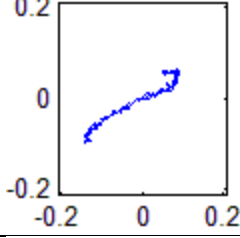
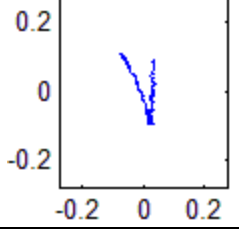
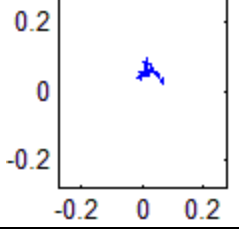
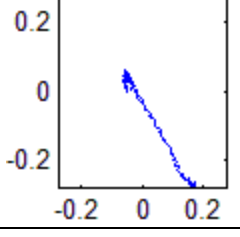
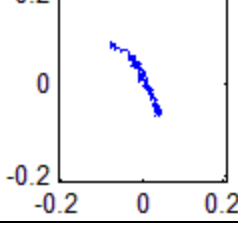
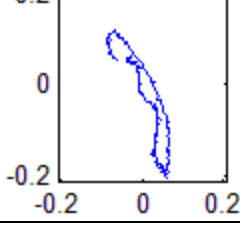
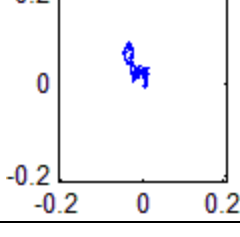


Таблица 3.4 Примеры траекторий движения имитатора ТВЭЛ. Траектории в каждой строке пронумерованы слева на право. Закрепление: шарнирное.

			L = 400 мм 1 – шумы 2 – 1.1 т/час 3 – 2.1 т/час
			L = 400 мм 1 – 2.7 т/час 2 – 2.7 т/час 3 – 2.7 т/час
			L = 400 мм 1 – 3.6 т/час 2 – 3.6 т/час 3 – 3.6 т/час
			L = 400 мм 1 – 6.0 т/час 2 – 6.0 т/час 3 – 6.0 т/час

В таблицах 3.3 и 3.4 представлены примеры траекторий имитатора ТВЭЛ, полученные с помощью емкостного датчика. Одно изображение состоит из 200 точек траектории. Время между точками составляет 0.5 мс (частота дискретизации 2 КГц). На каждом изображении показан фрагмент траектории за 0.1 секунды. Данные записывались в течение 10 секунд.

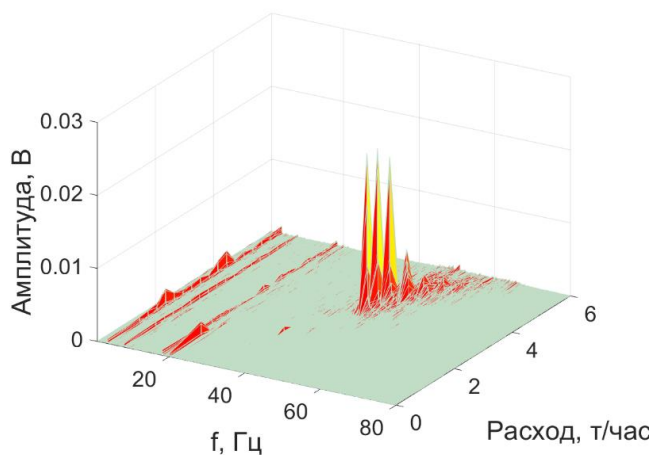


Рисунок 3.2. Спектр. $L = 300$ мм.
Закрепление: консольное

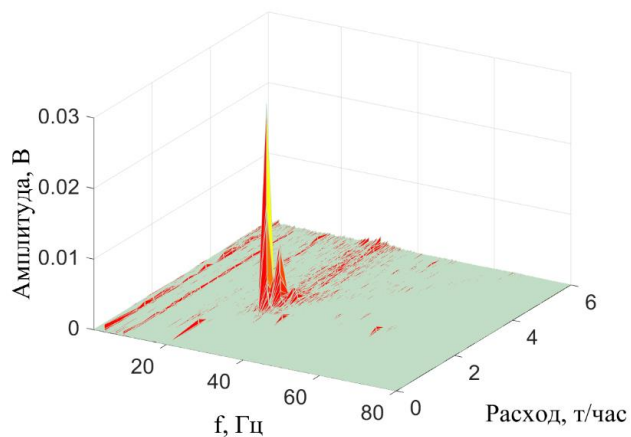


Рисунок 3.3. Спектр. $L = 400$ мм.
Закрепление: консольное

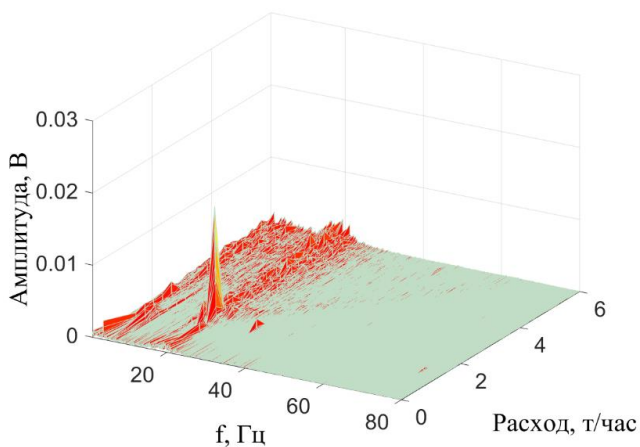


Рисунок 3.4. Спектр. $L = 500$ мм.
Закрепление: консольное.

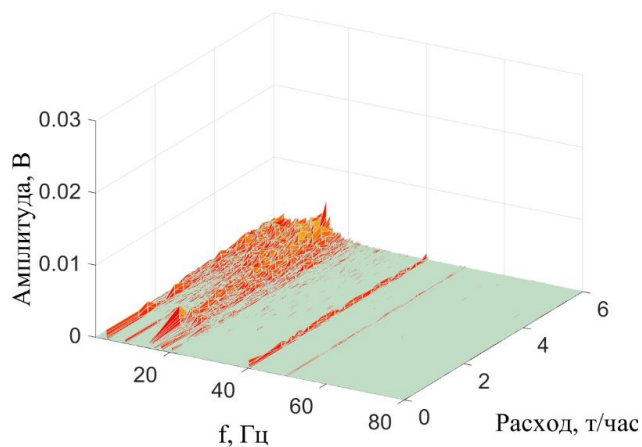


Рисунок 3.5. Спектр. $L = 600$ мм.
Закрепление: консольное.

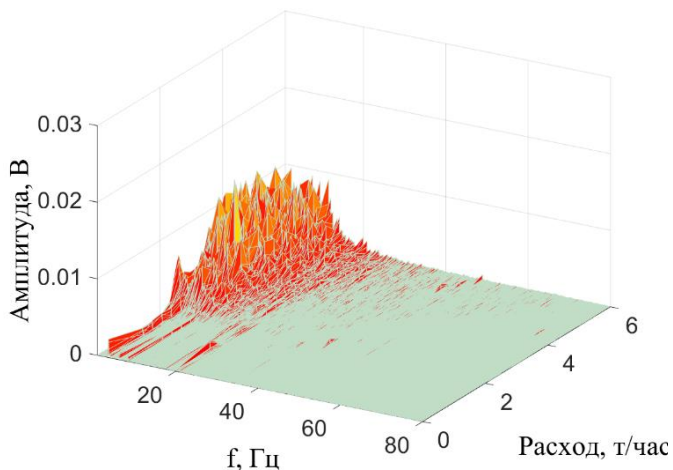


Рисунок 3.6. Спектр. $L=400$ мм.
Закрепление: шарнирное.

3.3 Анализ полученных данных

Данные, представленные в таблице 3.1 (консольное закрепление), наглядно показывают, что при длинах с $L = 400$ до $L = 800$ наблюдается практически линейное возрастание как R_{\max} (максимальное отклонение) так и R_{mean} (среднее отклонение). На фоне этого возрастания явно наблюдается локальный максимум. При увеличении L (длины имитатора), максимум смещается в сторону меньших расходов. При $L = 600$ мм сам максимум мы уже не наблюдаем, мы видим только его правую часть. При длине $L = 800$ локального максимума нет. Из траекторий, представленных в таблице 3.3, видно, что при расходах, соответствующих локальному максимуму R_{\max} и R_{mean} , изменяется характер движения имитатора. При расходах, соответствующих максимуму, возникает устойчивое круговое или близкое к круговому движение имитатора. При изменении расхода в большую или меньшую сторону «круговое движение» исчезает. Частоту колебаний можно определить из спектров, представленных на рисунках 3.2÷3.6. Из спектров видно, что локальные максимальные отклонения («круговое движение»), наблюдаются при $L = 300, 400, 500$ мм, при этом с увеличением L уменьшается частота «кругового движения». При шарнирном закреплении эффекта «кругового движения» не наблюдается.

3.4 Выводы по главе 3

Работы проведены в кольцевом канале. Диаметр внутренней трубки - 12 мм, диаметр внешней трубы - 26 мм.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены следующие данные. Показаны траектории имитатора ТВЭЛ в потоке теплоносителя в зависимости от способа закрепления, от длины имитатора, от расхода теплоносителя. Составлена база данных об амплитудно-частотных характеристиках колебаний стержней в широком диапазоне входных условий. Данные могут быть применены для верификации и валидации расчетных кодов.

Выводы по работе

1. Разработан емкостной метод измерения пространственного положения элементов конструкций энергетических установок. Применение разработанного метода позволило собрать экспериментальные данные по вибрации имитатора ТВЭЛ при продольном обтекании теплоносителем.
2. Изготовлен емкостной двухкоординатный датчик. Проведена калибровка датчика. Проведена оценка погрешности определения координат с помощью емкостного двухкоординатного датчика.
3. Проведена серия экспериментов по определению характеристик вибрации имитатора ТВЭЛ при различных параметрах потока, длины имитатора, способа крепления. Полученные данные помещены в базу данных. База данных предназначена для валидации расчетных кодов. Обнаружен ряд зависимостей параметров вибраций от длины имитатора и величины расхода теплоносителя.

Литература

1. Меледин В.Г. Информационная оптоэлектронная диагностика. Наука и инновационные промышленные технологии / Отв. редактор член-корр.РАН С.В.Алексееенко. ISBN 978-5-9907241-7-4. – Новосибирск: Академиздат, 2015. – 173 с.
2. Алексееенко С.В., Меледин В.Г., Аникин Ю.А., Бакакин Г.В., Главный В.Г., Двойнишников С.В., Кабардин И.К., Климов А.В., Кротов С.В., Куликов Д.В., Наумов И.В., Павлов В.А., Прибатурин Н.А., Рахманов В.В., Садбаков О.Ю., Чубов А.С., Щепихин И.В. Развитие оптико-информационных методов, систем и технологий бесконтактной диагностики гидродинамических процессов и трехмерных пространственных структур / Вихревые явления и их влияние на процессы переноса / под ред. Алексееенко С.В. и Наумова И.В.; Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. – 388 с. ISBN 978-5-4437-0808-9, формат 70x100/16, усл.-печ. л. 31,3. – С. 8-70.
3. Dvoynishnikov S.V., Kabardin I.K., Meledin V.G. Advanced Phase Triangulation Methods for 3D Shape Measurements in Scientific and Industrial Applications / In: Sergiyenko O., Flores-Fuentes W., Mercorelli P. (eds) Machine Vision and Navigation. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-22587-2_21. Print ISBN 978-3-030-22586-5. Online ISBN 978-3-030-22587-5.
4. Лобанов П.Д., Меледин В.Г., Прибатурин Н.А., Светоносов А.И., Щепихин И.В. Экспериментальное исследование вибрации вертикального стержня в потоке жидкости / Семинар вузов по теплофизике и энергетике. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. 21-23 октября 2019 года, Санкт-Петербург С.224-225
5. Лобанов П.Д., Меледин В.Г., Прибатурин Н.А., Светоносов А.И., Щепихин И.В. Исследование колебаний вертикального стержня при его продольном обтекании жидкостью / XIX Всероссийская школа-семинар «Современные проблемы аэрогидродинамики» Сочи «Буревестник» МГУ, 5-15 сентября 2019г.- Изд. МГУ. - С.66-67.

6. Lobanov P.D., Meledin V.G., Pribaturin N.A., Svetonosov A.I., Shchepikhin I.V. Experimental study of the vibration of a vertical rod in liquid flow / Journal of Physics: Conference Series. Scientific Conference “Thermophysics and Power Engineering in Academic Centers” TPEAC-2019.
7. Lobanov P.D., Meledin V.G., Svetonosov A.I., Pribaturin N.A., Shchepikhin I.V. Vibration of single rod in longitudinal liquid flow / Proceedings of 2020 28th International Conference on Nuclear Engineering Joint With the ASME 2020 Power Conference ICONE28-POWER2020 August 2-6, 2020, Anaheim, California, USA
8. Иванова Н.А., Кустова Т.Е. Перспективы развития атомной энергетики / Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-1. – С. 136-137; URL: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=33770> (дата обращения: 31.05.2020).
9. World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements. World Nuclear Association (1 августа 2019) (https://ru.wikipedia.org/wiki/Ядерная_энергетика)
10. Аш Ж. Датчики измерительных систем: В 2-х книгах. Книга 1. / М.: Мир, 1992. 480 с.
11. Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин, 4-е изд. / М.-Л.: Государственное энергетическое изд-во, 1966. 294 с.
12. Михайлов М.А., Манойлов В.В. Обзор методов измерения малых перемещений в приложении системы автоматического регулирования сканеров СЗМ. / Научное приборостроение, 2013, том 23, №2, с.27-37 (ISSN 0868-5886)
13. Ждексон Р.Г. Новейшие датчики. / М.: Техносфера 2007. 308 с.
14. Котюк А.Ф. Датчики в современных измерениях / М.: Горячая линия— Телеком, 2007. 95 с.
15. Челомей В.Н. Вибрации в технике. Справочник в 6 томах. Измерения и испытания. Том 5. / Москва «Машиностроение» 1981. 197 с.

16. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. Издание второе переработанное и дополненное. / Ленинград энергоиздат 1981.
17. Ovchinnikov N. N., Dvoynishnikov S. V., Glavny V. G., Sadbakov O. Yu., Shchepikhin I. V. Calibration error minimization method of three-dimensional geometry optical meter with two photodetectors / Journal of Physics: Conference Series, Volume 1359, conference 1 DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1359/1/012097>
18. Rakhmanov V.V., Anikin Yu.A., Kulikov D.V., Pavlov V.A., Shchepikhin I.V. The expansion of the dynamic range of photodetectors in hydrodynamic researches using active optical shutters / Journal of Physics: Conference Series 1359 (2019) 012088. DOI:10.1088/1742-6596/1359/1/012088.
19. Овчинников Н.Н., Двойнишников С.В., Главный В.Г., Садбаков О.Ю., Щерихин И.В. Метод минимизации ошибки калибровки триангуляционного измерителя трехмерной геометрии с двумя фотоприемниками / IV Всероссийской научной конференции "Теплофизика и физическая гидродинамика", 15-22 сентября 2019, Ялта.
20. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. Издание третье, исправленное. / М.: Наука, 1975. 752 с.
21. Датчики. Справочник. / Под ред. Готры З.Ю., Чайковского О.И. Львов: Каменяр, 1995. 313 с.
22. Ацюковский В.А. Емкостные дифференциальные датчики перемещения / М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. 106 с.
23. Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение / М.: Мир, 1989. 192 с.
24. Матлин С.Л. Как измерить емкость конденсатора / М.: Госэнергоиздат, 1952. 28 с.
25. Топильский В.Б. Схемотехника измерительных устройств / М.: Бинوم, 2006. 232 с.
26. Цифровой измеритель емкости / Опубликовано 10.12.2008. URL: (<http://radioded.ru/>).

27.Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений /
Л.: Энергоатомиздат, 1991 248 с.

Приложение 1. Экспериментальные данные

Таблица П1.1. Данные по вибрации. Дата: 28.09.2018. Длина имитатора: 600 мм. Тип закрепления: консольное. Теплоноситель: вода.

Номер измерения	Расход т/час	X				Y				R		
		X max	X min	X mean	X std	Y max	Y min	Y mean	Y std	R max	R mean	R std
1	0.0	0.02	-0.02	0.00	0.00	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00
2	1.1	0.06	-0.06	0.00	0.02	0.05	-0.06	0.00	0.02	0.06	0.02	0.01
3	1.5	0.05	-0.04	0.00	0.01	0.05	-0.05	0.00	0.01	0.05	0.01	0.01
4	1.8	0.04	-0.04	0.00	0.01	0.04	-0.04	0.00	0.01	0.04	0.01	0.01
5	2.1	0.05	-0.04	0.00	0.01	0.04	-0.03	0.00	0.01	0.05	0.01	0.01
6	2.4	0.04	-0.05	0.00	0.01	0.04	-0.04	0.00	0.01	0.05	0.01	0.01
7	2.7	0.06	-0.05	0.00	0.01	0.05	-0.05	0.00	0.01	0.06	0.02	0.01
8	3.0	0.06	-0.05	0.00	0.01	0.05	-0.05	0.00	0.01	0.06	0.02	0.01
9	3.3	0.06	-0.06	0.00	0.02	0.06	-0.06	0.00	0.02	0.08	0.02	0.01
10	3.6	0.06	-0.07	0.00	0.02	0.08	-0.09	0.00	0.02	0.09	0.03	0.01
11	3.9	0.08	-0.08	0.00	0.02	0.10	-0.10	0.00	0.02	0.11	0.03	0.02
12	4.2	0.10	-0.08	0.00	0.03	0.09	-0.10	0.00	0.03	0.10	0.03	0.02
13	4.5	0.11	-0.09	0.00	0.03	0.09	-0.11	0.00	0.03	0.13	0.03	0.02
14	4.8	0.14	-0.10	0.00	0.03	0.11	-0.09	0.00	0.03	0.14	0.04	0.02
15	5.1	0.14	-0.13	0.00	0.03	0.09	-0.12	0.00	0.03	0.14	0.04	0.02
16	5.4	0.16	-0.16	0.00	0.04	0.12	-0.14	0.00	0.04	0.16	0.05	0.02
17	5.7	0.13	-0.13	0.00	0.04	0.17	-0.15	0.00	0.04	0.18	0.05	0.03
18	6.0	0.18	-0.12	0.00	0.04	0.13	-0.14	0.00	0.04	0.18	0.05	0.03

Таблица П1.2. Данные по вибрации. Дата: 01.10.2018. Длина имитатора: 400 мм. Тип закрепления: консольное. Теплоноситель: вода.

Номер измерения	Расход т/час	X				Y				R		
		X max	X min	X mean	X std	Y max	Y min	Y mean	Y std	R max	R mean	R std
1	0.0	0.02	-0.01	0.00	0.00	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00
2	0.0	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.02	-0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
3	0.0	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.02	-0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
4	1.1	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.02	-0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00
5	1.4	0.02	-0.02	0.00	0.00	0.02	-0.03	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00
6	1.7	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00
7	2.0	0.03	-0.03	0.00	0.01	0.04	-0.03	0.00	0.01	0.04	0.01	0.01
8	2.3	0.26	-0.28	0.00	0.16	0.16	-0.17	0.00	0.08	0.28	0.17	0.05
9	2.7	0.11	-0.10	0.00	0.04	0.13	-0.13	0.00	0.06	0.14	0.07	0.02

10	2.9	0.08	-0.09	0.00	0.02	0.07	-0.07	0.00	0.02	0.09	0.03	0.02
11	3.3	0.05	-0.05	0.00	0.01	0.05	-0.05	0.00	0.01	0.05	0.02	0.01
12	3.6	0.05	-0.05	0.00	0.01	0.04	-0.05	0.00	0.01	0.05	0.01	0.01
13	3.9	0.05	-0.04	0.00	0.01	0.04	-0.05	0.00	0.01	0.05	0.02	0.01
14	4.2	0.05	-0.05	0.00	0.01	0.06	-0.06	0.00	0.01	0.06	0.02	0.01
15	4.5	0.06	-0.05	0.00	0.01	0.05	-0.05	0.00	0.01	0.06	0.02	0.01
16	4.8	0.06	-0.07	0.00	0.02	0.06	-0.06	0.00	0.01	0.07	0.02	0.01
17	5.1	0.08	-0.06	0.00	0.02	0.05	-0.05	0.00	0.02	0.09	0.02	0.01
18	5.4	0.06	-0.08	0.00	0.02	0.08	-0.07	0.00	0.02	0.08	0.02	0.01
19	6.0	0.08	-0.07	0.00	0.02	0.07	-0.08	0.00	0.02	0.08	0.03	0.01
20	0.0	0.13	-0.15	0.00	0.06	0.24	-0.22	0.00	0.10	0.27	0.11	0.04
21	0.0	0.05	-0.05	0.00	0.02	0.09	-0.08	0.00	0.04	0.09	0.04	0.02

Таблица П1.3. Данные по вибрации. Дата: 04.10.2018. Длина имитатора: 300 мм. Тип закрепления: консольное. Теплоноситель: вода.

Номер измерения	Расход т/час	X				Y				R		
		max	min	mean	std	max	min	mean	std	max	mean	std
1	1.1	0.03	-0.04	0.00	0.01	0.03	-0.02	0.00	0.01	0.04	0.01	0.01
2	1.5	0.02	-0.02	0.00	0.00	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00
3	1.8	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00
4	2.1	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.04	-0.04	0.00	0.01	0.04	0.01	0.01
5	2.4	0.02	-0.02	0.00	0.00	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00
6	2.7	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.03	-0.02	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00
7	3.0	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.03	-0.02	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00
8	3.3	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.03	-0.02	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00
9	3.6	0.20	-0.20	0.00	0.12	0.15	-0.15	0.00	0.07	0.21	0.13	0.04
10	3.9	0.20	-0.21	0.00	0.12	0.14	-0.15	0.00	0.06	0.22	0.13	0.04
11	4.2	0.19	-0.20	0.00	0.11	0.15	-0.17	0.00	0.06	0.20	0.12	0.03
12	4.5	0.13	-0.14	0.00	0.04	0.11	-0.12	0.00	0.04	0.17	0.06	0.02
13	4.8	0.07	-0.09	0.00	0.02	0.08	-0.08	0.00	0.03	0.09	0.03	0.02
14	5.1	0.07	-0.07	0.00	0.02	0.07	-0.07	0.00	0.02	0.07	0.02	0.01
15	5.4	0.05	-0.06	0.00	0.02	0.05	-0.05	0.00	0.02	0.07	0.02	0.01
16	5.7	0.06	-0.06	0.00	0.02	0.05	-0.05	0.00	0.01	0.07	0.02	0.01
17	6.0	0.05	-0.05	0.00	0.01	0.06	-0.06	0.00	0.01	0.06	0.02	0.01
18	0.0	0.03	-0.03	0.00	0.01	0.02	-0.03	0.00	0.01	0.04	0.01	0.01
19	0.0	0.23	-0.27	0.00	0.11	0.52	-0.53	0.00	0.22	0.57	0.22	0.11

Таблица П1.4. Данные по вибрации. Дата: 05.10.2018. Длина имитатора: 500 мм. Тип закрепления: консольное. Теплоноситель: вода.

Номер измерения	Расход т/час	X				Y				R		
		max	min	mean	std	max	min	mean	std	max	mean	std
1	1.1	0.03	-0.02	0.00	0.01	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00
2	1.5	0.05	-0.05	0.00	0.02	0.04	-0.04	0.00	0.01	0.06	0.02	0.01
3	1.8	0.12	-0.13	0.00	0.05	0.10	-0.11	0.00	0.05	0.13	0.06	0.02
4	2.1	0.06	-0.05	0.00	0.01	0.07	-0.07	0.00	0.02	0.08	0.02	0.01
5	2.4	0.05	-0.04	0.00	0.01	0.04	-0.05	0.00	0.01	0.06	0.02	0.01
6	2.7	0.06	-0.04	0.00	0.01	0.04	-0.05	0.00	0.01	0.06	0.02	0.01
7	3.0	0.06	-0.04	0.00	0.01	0.05	-0.05	0.00	0.01	0.06	0.02	0.01
8	3.3	0.05	-0.05	0.00	0.01	0.07	-0.05	0.00	0.02	0.07	0.02	0.01
9	3.6	0.08	-0.06	0.00	0.02	0.06	-0.07	0.00	0.02	0.08	0.02	0.01
10	3.9	0.08	-0.08	0.00	0.02	0.05	-0.06	0.00	0.02	0.08	0.02	0.01
11	4.2	0.07	-0.07	0.00	0.02	0.08	-0.08	0.00	0.02	0.08	0.03	0.01
12	4.5	0.08	-0.08	0.00	0.03	0.07	-0.08	0.00	0.02	0.09	0.03	0.02
13	4.8	0.08	-0.13	0.00	0.03	0.09	-0.10	0.00	0.03	0.14	0.03	0.02
14	5.1	0.11	-0.09	0.00	0.03	0.09	-0.08	0.00	0.03	0.14	0.03	0.02
15	5.4	0.11	-0.10	0.00	0.03	0.10	-0.11	0.00	0.03	0.11	0.04	0.02
16	5.7	0.13	-0.14	0.00	0.03	0.11	-0.13	0.00	0.04	0.16	0.04	0.02
17	6.0	0.11	-0.12	0.00	0.04	0.14	-0.15	0.00	0.04	0.16	0.05	0.02

Таблица П1.5. Данные по вибрации. Дата: 18.10.2018. Длина имитатора: 400 мм. Тип закрепления: шарнирное. Теплоноситель: вода.

Номер измерения	Расход т/час	X				Y				R		
		max	min	mean	std	max	min	mean	std	max	mean	std
1	1.1	0.03	-0.02	0.00	0.01	0.03	-0.02	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00
2	1.5	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.02	-0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00
3	1.8	0.02	-0.02	0.00	0.00	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00
4	2.1	0.06	-0.05	0.00	0.01	0.05	-0.04	0.00	0.01	0.07	0.02	0.01
5	2.4	0.08	-0.07	0.00	0.03	0.07	-0.09	0.00	0.02	0.10	0.03	0.02
6	2.7	0.21	-0.16	0.00	0.05	0.10	-0.20	0.00	0.04	0.25	0.06	0.03
7	3.0	0.14	-0.18	0.00	0.05	0.11	-0.17	0.00	0.05	0.18	0.06	0.03
8	3.3	0.15	-0.15	0.00	0.05	0.13	-0.15	0.00	0.05	0.18	0.07	0.03
9	3.6	0.25	-0.21	0.00	0.07	0.14	-0.28	0.00	0.06	0.32	0.08	0.04
10	3.9	0.19	-0.20	0.00	0.06	0.13	-0.23	0.00	0.06	0.29	0.08	0.04
11	4.2	0.18	-0.21	0.00	0.07	0.14	-0.25	0.00	0.07	0.27	0.08	0.04
12	4.5	0.14	-0.19	0.00	0.06	0.13	-0.23	0.00	0.06	0.24	0.08	0.04

13	4.8	0.13	-0.22	0.00	0.06	0.14	-0.27	0.00	0.06	0.29	0.07	0.04
14	5.1	0.12	-0.19	0.00	0.05	0.14	-0.27	0.00	0.07	0.29	0.08	0.04
15	5.4	0.10	-0.20	0.00	0.05	0.15	-0.27	0.00	0.06	0.27	0.07	0.04
16	5.7	0.11	-0.17	0.00	0.04	0.14	-0.26	0.00	0.06	0.28	0.07	0.04
17	6.0	0.09	-0.13	0.00	0.04	0.13	-0.21	0.00	0.06	0.22	0.06	0.04
18	0.0	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.02	-0.02	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00
19	0.0	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.02	-0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00
20	0	0.15	-0.18	0.00	0.08	0.24	-0.29	0.00	0.12	0.33	0.13	0.06

Таблица П1.6. Данные по вибрации. Дата: 25.05.2020. Длина имитатора: 800 мм. Тип закрепления: консольное. Теплоноситель: вода.

Номер измерения	Расход т/час	X				Y				R			
		max	min	mean	std	max	min	mean	std	max	min	mean	std
5	0.2	0.02	-0.02	0.00	0.01	0.02	-0.03	0.00	0.01	0.03	0.00	0.01	0.00
6	2.3	0.05	-0.05	0.00	0.01	0.05	-0.06	0.00	0.01	0.06	0.00	0.02	0.01
7	3.2	0.11	-0.12	0.00	0.03	0.10	-0.14	0.00	0.03	0.14	0.00	0.04	0.02
8	3.6	0.12	-0.15	0.00	0.04	0.10	-0.11	0.00	0.03	0.16	0.00	0.04	0.02
9	3.9	0.15	-0.18	0.00	0.04	0.15	-0.13	0.00	0.04	0.19	0.00	0.05	0.03
10	4.2	0.18	-0.21	0.00	0.05	0.15	-0.15	0.00	0.05	0.21	0.00	0.06	0.03
11	4.5	0.24	-0.19	0.00	0.05	0.16	-0.16	0.00	0.04	0.25	0.00	0.06	0.03
12	4.8	0.18	-0.21	0.00	0.05	0.21	-0.21	0.00	0.05	0.22	0.00	0.06	0.03
13	5.2	0.18	-0.24	0.00	0.06	0.17	-0.19	0.00	0.05	0.25	0.00	0.07	0.04
14	5.5	0.23	-0.23	0.00	0.07	0.19	-0.19	0.00	0.06	0.24	0.00	0.08	0.04
15	5.8	0.21	-0.28	0.00	0.07	0.25	-0.22	0.00	0.07	0.31	0.00	0.09	0.05
16	6.1	0.26	-0.32	0.00	0.08	0.28	-0.26	0.00	0.07	0.33	0.00	0.09	0.05
17	6.4	0.26	-0.33	0.00	0.09	0.32	-0.32	0.00	0.08	0.35	0.00	0.10	0.06
18	6.7	0.30	-0.40	0.00	0.09	0.34	-0.33	0.00	0.09	0.42	0.00	0.11	0.06
19	7.0	0.28	-0.50	0.00	0.09	0.26	-0.32	0.00	0.09	0.51	0.00	0.12	0.06
20	7.3	0.38	-0.32	0.00	0.10	0.34	-0.36	0.00	0.10	0.39	0.00	0.13	0.07
21	7.6	0.32	-0.45	0.00	0.11	0.38	-0.34	0.00	0.10	0.48	0.00	0.13	0.07
22	7.9	0.37	-0.53	0.00	0.11	0.34	-0.35	0.00	0.11	0.54	0.00	0.14	0.08

Приложение 2. Вычисление координат точек пересечения двух окружностей

Нахождение точек пересечения двух окружностей. Даны координаты центров окружностей и их радиусы. Необходимо найти координаты точек пересечения этих окружностей.

Пусть: точка p_1 – центр первой окружности, p_2 – центр второй окружности, p_3 – точка пересечения окружностей.

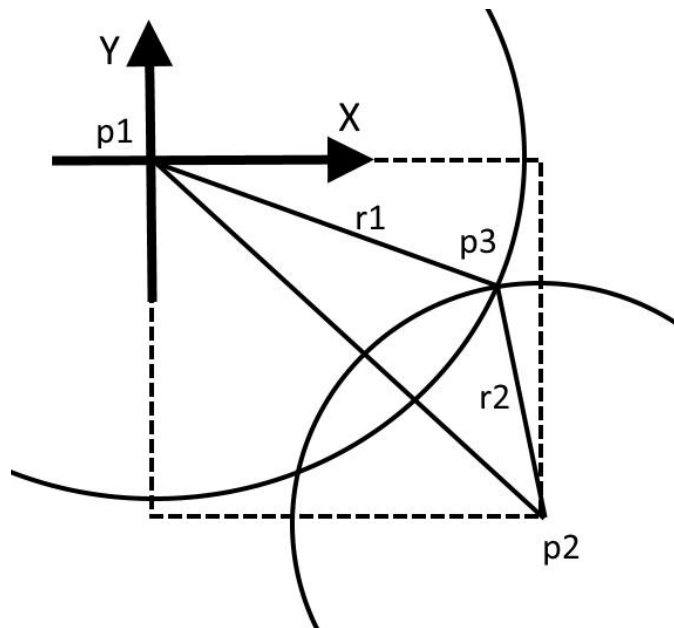


Рисунок П2.1. Пересечение двух окружностей. Пунктиром выделены границы емкостного сенсора.

Поместим центр системы координат в точку p_1 .

Обозначим координаты точки p_j как x_j, y_j .

Запишем систему уравнений для точки p_3 :

$$x_3^2 + y_3^2 = r_1^2$$

$$(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 = r_2^2$$

Раскроем скобки во втором уравнении:

$$x_3^2 + y_3^2 = r_1^2$$

$$x_3^2 - 2x_3 x_2 + x_2^2 + y_3^2 - 2y_3 y_2 + y_2^2 = r_2^2$$

Вычтем из второго уравнения первое:

$$-2x_3 x_2 + x_2^2 - 2y_3 y_2 + y_2^2 = r_2^2 - r_1^2$$

Перенесем известные величины в правую часть:

$$x_3 x_2 + y_3 y_2 = \frac{r_2^2 - r_1^2 - x_2^2 - y_2^2}{-2}$$

Обозначим:

$$\frac{r_2^2 - r_1^2 - x_2^2 - y_2^2}{-2} = C$$

Выразим:

$$x_3 = \frac{C - y_3 y_2}{x_2}$$

Если x_2 не равен 0, в нашем случае x_2 никогда не равно 0, то подставим x_3 в первое уравнение:

$$\frac{(C - y_3 y_2)^2}{x_2^2} + y_3^2 = r_1^2$$

Умножим левую и правую часть на x_2^2 , раскроем скобки, перенесем все в левую часть:

$$C^2 - 2C y_3 y_2 + y_3^2 y_2^2 + y_3^2 x_2^2 - r_1^2 x_2^2 = 0$$

Перепишем уравнение:

$$y_3^2(x_2^2 + y_2^2) + y_3(-2C y_2) + (C^2 - r_1^2 x_2^2) = 0$$

Как видим, получается квадратное уравнение. Обозначим:

$$a = (x_2^2 + y_2^2)$$

$$b = (-2C y_2)$$

$$e = (C^2 - r_1^2 x_2^2)$$

Тогда:

$$D = b^2 - 4ae$$

Если $D < 0$, окружности не пересекаются.

Если $D = 0$, окружности касаются.

Если $D > 0$, окружности пересекаются и имеют две точки пересечения.

$$y_3 = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a}; \quad x_3 = \frac{C - y_3 y_2}{x_2}$$