

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Хоссейн Исмаил

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПОВЫШЕНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ И СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ
ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС с РЕАКТОРОМ ВВЭР**

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и вывод из эксплуатации

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена на кафедре «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Велькин Владимир Иванович

Официальные оппоненты: **Токманцев Валерий Иванович,**
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, заведующий кафедрой технической физики;

Ремез Виктор Павлович,
доктор технических наук, старший научный сотрудник, ООО «Научно-производственное предприятие ЭКСОРБ», г. Екатеринбург, директор;

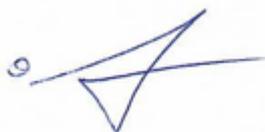
Алексеев Сергей Геннадьевич,
кандидат химических наук, доцент, АНО «Уральский Научно-исследовательский институт Всероссийского добровольного пожарного общества», г. Екатеринбург, научный консультант

Защита состоится «16» декабря 2021 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.03.04 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Учёного совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=2996>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Ташлыков Олег Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Между Россией и республикой Бангладеш заключён договор о сооружении на территории республики атомной электростанции с реакторами типа ВВЭР. Так как республика Бангладеш находится в сейсмически активной зоне, была поставлена задача выполнить анализ влияния сейсмических воздействий на процессы вибрации и другие теплофизические процессы с точки зрения обеспечения безопасности атомной электростанции. Работа состоит из нескольких разделов:

Первый раздел – это анализ сейсмической ситуации в республике Бангладеш и влияние сейсмических колебаний грунта на площадку будущей атомной электростанции.

Второй раздел – это анализ вибрационных характеристик, вызываемых или стимулируемых теплофизическими и гидродинамическими процессами, протекающими в оборудовании АЭС при нормальной эксплуатации и стойкости к изменениям при сейсмическом воздействии.

Третий раздел – влияние сейсмических воздействий на процессы, протекающие в первом контуре ядерной энергетической установки в случае возникновения сейсмических колебаний, влияния на поведение теплоносителя первого контура.

Одной из важнейших задач при эксплуатации объектов атомной энергетики является обеспечение безопасности и высокой надёжности АЭС.

Народная Республика Бангладеш (РБ) реализует на своей территории проект строительства двух блоков атомных электростанций, вырабатывающих 2,4 ГВт, которые будут введены в эксплуатацию в 2023 и 2024 годах под названием «Атомная электростанция Руппур» (РАЭС). Однако, регион расположения РБ всегда считался сейсмоопасным. Сейсмическое воздействие, характеризующееся низкочастотными колебаниями природного характера, потенциально может привести к разрушительным последствиям для энергоблока и рабочего состояния электростанции, воздействуя на присущие технологическому оборудованию низкочастотные колебания, имеющие техническую причину.

На электростанциях любого типа имеются многочисленные трубопроводы, в том числе с двухфазным течением теплоносителя.

Отличительной чертой двухфазных потоков является неустойчивость течения, вызывающая низкочастотные вибрации, приводящие к разрушению и выходу из строя трубопроводов со всеми вытекающими последствиями. На АЭС и ТЭС вибрация трубопровод с двухфазными вскипающими потоками превратилась в серьёзную проблему, затрудняющую в некоторых случаях эксплуатацию оборудования. Эта проблема затрагивает в основном вспомогательные трубопроводы, какими являются трубопроводы продувки (непрерывной и периодической) «растопочные» трубопроводы, служащие для отвода сконденсировавшегося пара в паропроводах при пуске энергоустановки и трубопроводы отборов пара и конденсаторопроводы сепараторов пароперегревателей (СПП) и подогревателей высокого давления (ПВД).

Вибрации, связанные с течением пароводяной смеси, имеют место на паропроводах и трубопроводах РОУ и БРОУ при отсутствии хорошего дренирования конденсата пара. В прикладном аспекте снижение вибрации трубопроводов с двухфазными потоками позволяет повысить надёжность и ресурс трубопроводных систем, снизить затраты на техническое обслуживание и ремонт, повысить к.п.д. и КИУМ АЭС. Однако, в настоящее время до сих пор отсутствуют надежные и технологичные системы снижения вибрации трубопроводов. Поэтому повышение надежной и безопасной эксплуатации трубопроводов, испытывающих проточные вибрационные воздействия, а также внедрение устройств для пассивно-управляемого снижения вибраций, является весьма актуальной задачей и имеет важное хозяйственное значение для энергетической и ряда других отраслей.

Степень разработанности темы исследования. Тема исследована в полном объеме для одного диаметра трубопровода, что подразумевает, с учетом теории подобия, дальнейшее распространение алгоритма исследований на любые трубопроводы и режимы двухфазного течения.

Объект исследования – низкочастотные колебания оборудования АЭС, в том числе вибрации в трубопроводах с двухфазным течением среды на объектах энергетики.

Предмет исследования – устройства для пассивного управления и снижения вибраций трубопроводов с двухфазным течением теплоносителя.

Цель работы: разработка эффективных устройств для снижения вибраций трубопроводов с двухфазным течением и повышение вибрационной и сейсмической стойкости тепломеханического оборудования АЭС.

Задачи исследования:

1. Анализ сейсмической обстановки в регионе размещения АЭС «Руппур» с потенциального воздействия на вероятное усиление виброперемещения трубопроводов с двухфазным потоком.

2. Создание экспериментальных стендов:

а) вибродиагностического с аппаратурой СД-12 М

б) лазерного с использованием PIV-метода

в) установки для исследований вскипания перегретой жидкости

г) установки для исследования кипения жидкости в узких каналах.

3. Разработка и исследование эффективности пассивных устройств для снижения низкочастотных колебаний трубопроводов энергетического оборудования.

4. Анализ влияния низкочастотных колебаний на мгновенное вскипание перегретого теплоносителя в узком канале при отсутствии циркуляции (в результате сейсмического воздействия и аварийного отключения насосов).

Научная новизна. Выполненное исследование позволило получить следующие новые научные результаты:

- экспериментально исследованы закономерности возникновения вибраций после прохождения поворотных участков в трубопроводах при

различных режимах течения двухфазных потоков. В частности, показано, что пассивные устройства (завихрители) снижают виброперемещение трубопровода на 25-40 %, при среднеквадратичном отклонении в ходе экспериментов 15-20%.

- разработаны рекомендации по конструированию устройств пассивного типа для управления гидродинамической структурой двухфазного потока с целью снижения вибраций трубопровода и повышения надежности эксплуатации, стойкости и ресурса АЭС в сейсмоопасных районах.
- получены новые экспериментальные данные о влиянии низкочастотных колебаний на вскипание теплоносителя в узком канале в отсутствие циркуляции.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в разработке алгоритмов исследования вставок – завихрителей и их испытания при различных режимах течения двухфазных сред.

- практически проведен и представлен анализ сейсмической опасности в районе строительства АЭС Руппур (Республика Бангладеш);
- созданы экспериментальные стенды для формирования различных режимов двухфазных течений и исследования устройств снижения вибраций трубопроводов;
- разработаны устройства- завихрители пассивного типа для управления (снижения) вибрациями в трубопроводах энергетического оборудования;
- разработаны рекомендации по конструкции устройств пассивного типа для управления гидродинамической структурой двухфазного потока с целью снижения вибраций, возникающих при изменении направления движения теплоносителя в трубопроводе, что позволяет выполнять технологические мероприятия для снижения вибраций трубопроводов на предприятиях различных отраслей промышленности (помимо энергетики - в пищевой и химической).

Использование устройств пассивного типа для управления гидродинамикой потока позволяет снизить амплитуду виброперемещений трубопровода на 25-40%. При этом, как результат, сокращаются расходы на техническое обслуживание и ремонт, повышается ресурс и надежность оборудования, а также безопасность объекта в целом.

Методология и методы исследования. Экспериментальные исследования осуществлялись методом планируемого эксперимента, а в качестве методик применялись классические методики исследований двухфазных течений, методы анализа частотных спектров и температурных градиентов.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

- анализ сейсмической опасности при строительстве атомной электростанции на площадке АЭС Руппур (Республика Бангладеш);
- результаты экспериментального изучения вибраций после прохождения поворотных участков трубопровода при различных режимах течения двухфазного потока;

- исследование характеристик течения жидкости в трубопроводах с использованием PIV-метода (лазерной велосимметрии);
- результаты экспериментов по влиянию устройств пассивного типа на управление гидродинамической структурой в поворотном участке и снижение вибро-перемещения трубопровода;
- результаты исследований вскипания перегретой жидкости в узких каналах.

Степень достоверности результатов исследования. подтверждается следующим: полученные в работе научные результаты базируются на классических теориях теплообмена и гидродинамики двухфазных сред; удовлетворительным соответствием результатов расчетов, полученных в ходе исследований, экспериментальным характеристикам, а также известным ранее экспериментальным и теоретическим данным других авторов.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на

- международной конференции по вибрационным технологиям (Лиссабон, Португалия, сентябрь, 2018г.);
- научной конференции- саммите АТУРК (Екатеринбург, 2018, «Лучшая научная работа молодого ученого»);
- всероссийской конференции с международным участием «XXXIII Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2017г.);
- конференция молодых ученых УралЭНИИ (Екатеринбург, УрФУ, 2017 г.);
- научной секции Всемирного фестиваля молодежи и студентов «Доступная космическая энергия будущего» (Сочи, Россия, 2017 г.);
- Международном конкурсе Российской государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» (видеопредставления молодых ученых 20 стран мира о развитии атомной энергетики в их странах; Диплом 3 степени от ГК «Росатом», Москва, 2017г);
- конференции молодых ученых. УралЭНИИ, (Екатеринбург, УрФУ, 2016г.);
- XVII Школе молодых ученых «Безопасность критических инфраструктур и территорий», (Екатеринбург, УрО РАН, УрФУ, 2016г., 2018),
- конференции по науке и технологиям для молодых исследователей Уральского энергетического института, (Екатеринбург, УрФУ, 2015 г).

Личный вклад автора. Автором осуществлены:

- разработка и создание трех экспериментальных стендов;
- стенд для лазерной трассерной велосимметрии (с использованием PIV-метода);
- экспериментальная установка для исследований вскипания перегретой жидкости;

- экспериментальный стенд для исследований влияния низкочастотных колебаний (например, при землетрясении) на вскипание перегретой жидкости в узком канале;
- реализация задач по подготовке и проведению экспериментов;
- проведение исследований характеристик разрабатываемых вставок на вибродиагностическом стенде с различными поворотными участками и вибродиагностическим оборудованием;
- обработка результатов экспериментов, разработка и патентная защита новой конструкции устройства пассивного типа для снижения вибраций трубопроводов;
- экспериментальное исследование эффективности различных устройств-завихрителей, выполненное с использованием метода лазерной велосимметрии (PIV-метод).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 5 статей опубликовано в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, включая 4 статьи – в изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из 5-ти глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 156 страниц текста, 47 рисунков, 7 таблиц, список литературы из 134 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются ее цели, научная и практическая значимость исследования. дано описание потенциальной опасности сейсмического воздействия на надежность функционирования атомной электростанции.

В главе 1 описан обзор литературы и представлена постановка задач исследования. Отмечен вклад в развитие данной области Российских специалистов, в частности, таких видных ученых, как Э.У. Незаметдинов, Б.Г. Коренева, В. Х. Мюнзе, П.Л. Кириллов, Н.Ш. Исаков и др. Приведены краткие теоретические сведения о влиянии вибраций в трубопроводах энергетических объектов на стойкость, ресурс и надежность эксплуатации АЭС, характеристические параметры для колебательного состояния трубопровода, пристеночные пульсации давления при двухфазных потоках, возникновения вибрации в результате воздействия сейсмических нагрузок.

Показано, что вибрационное состояние трубопроводов характеризуется следующими параметрами: размах (для гармонического процесса - двойная амплитуда), частота (спектр), фаза виброперемещений оболочки. Эти параметры характеризуют форму колебаний трубопровода; величина (размах) пульсаций давления в трубопроводе; скорость пробега ударной волны (м/с), определяемая приближенно по формуле

$$C = \frac{1425}{\sqrt{(1+0.1AD/\delta)}}, \quad (1.1)$$

где D - диаметр трубопровода, мм; b - толщина оболочки, мм; A - коэффициент, равный 1,0 для трубопровода без колец жесткости, 0,3-0,4 для трубопровода с кольцами жесткости.

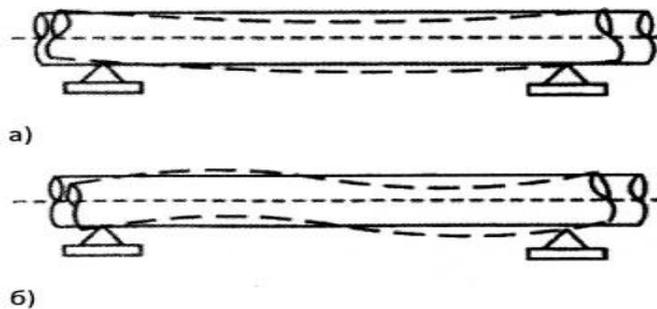
Собственные частоты поперечных колебаний (балочных форм) [Гц], определяются конкретно для каждого трубопровода при испытаниях или с использованием формулы

$$F_k = \frac{m^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJg}{q}}, \quad (1.2)$$

где m - коэффициент для многопролетного свободнолежащего на опорах трубопровода с одним компенсатором на конце, l - длина пролета между промежуточными опорами, см;

E - модуль упругости, кг/см²; J - момент инерции, см; D - наружный диаметр трубопровода; d - внутренний диаметр трубопровода; g - ускорение свободного падения, см/с²; q - итоговая собственная масса оболочки трубопровода и собственная масса воды.

Рисунок 1.1 балочные формы колебаний трубопровода: а. Первая форма; б. вторая форма



Приведены теоретические сведения о сейсмических спектрограмма в соответствии Борман П. и др. Существует несколько параметров, которые характеризуют размеры и силу сейсмических источников. Спектр сейсмического источника, сейсмический момент и размер области источника описывают количественную меру размера и силы сейсмического источника сдвига - скалярного сейсмического момента M_0 .

$$M_0 = \mu \bar{D} A, \quad (1.3)$$

где μ - жесткость или модуль сдвига среды, \bar{D} - среднее конечное смещение после разрыва, A - площадь поверхности разрыва. M_0 является мерой необратимой неупругой деформации в области разрыва.

В главе 2 описываются методы исследований, экспериментальные установки, анализ погрешностей измерений при определении показателей эффективности завихрителей (снижение виброускорений, виброскорости и виброперемещений трубопроводов) и при измерениях температур.

К примеру, поддаются расчету следующие виды нестационарных состояний трубопровода:

- свободные колебания трубопроводов;
- вынужденные колебания;
- акустические колебания;
- амплитудные колебания;
- колебания, вызванные пульсацией теплоносителя;
- всевозможные комбинации при сложении колебаний.

Представлено описание экспериментального вибродиагностического стенда (рис.2.1). Стенд представлял собой замкнутый трубопровод с характерными поворотными участками, в которых чаще всего возникают колебания. На трубопроводе в нескольких местах смонтированы площадки для установки датчиков анализатора вибрационных сигналов СД-12М. Для визуального наблюдения за структурой потока стенд оборудован прозрачными узлами визуализации.

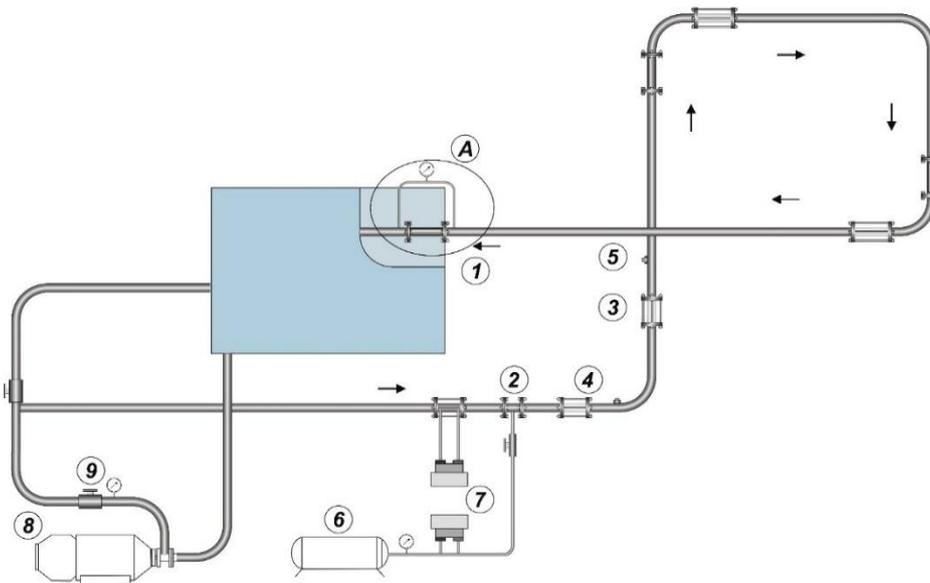


Рисунок 2.1 Упрощенная схема экспериментальной установки (1-бак, 2-узел смешения, 3-узел визуализации, 4-вставка-завихритель, 5-датчик вибраций, 6-компрессор, 7-узлы измерения расходов, 8-насос, 9-вентиль, А-участок измерения гидравлического сопротивления).

Основные геометрические характеристики исследуемых участков трубопровода экспериментального стенда:

- диаметр трубопровода $D=44$ мм.
- 1. вертикальный подъемный $L=3090$ мм.,

2. горизонтальный $L=3270$ мм;
3. вертикальный опускной $L=2060$ мм.
4. Радиус кривизны поворотных участков $R=355$ мм.

Основные технические характеристики экспериментальной установки:

1. Диапазон изменения скорости воды: 0 – 18,5 м/с;
2. Диапазон изменения скорости газовой фазы: 0 – 20 м/с;
3. Диапазон изменения истинного объемного паро-(газо) содержания: 0 – 95%;
4. Температура среды: 20 °С;
5. Диапазон регистрируемых частот колебаний участков трубопровода: 0 – 10000 Гц;
6. Диапазон исследуемых низкочастотных колебаний поворотных участков 0 – 25 Гц;
7. Длина реализации при записи показаний вибраций: 10– 30 сек;
8. Разрешение по частоте: 0,25 Гц.

Исследовательская работа проводилась на экспериментальном стенде, имитирующем различные участки реального трубопровода, схема которого представлена на рисунке 2.2.

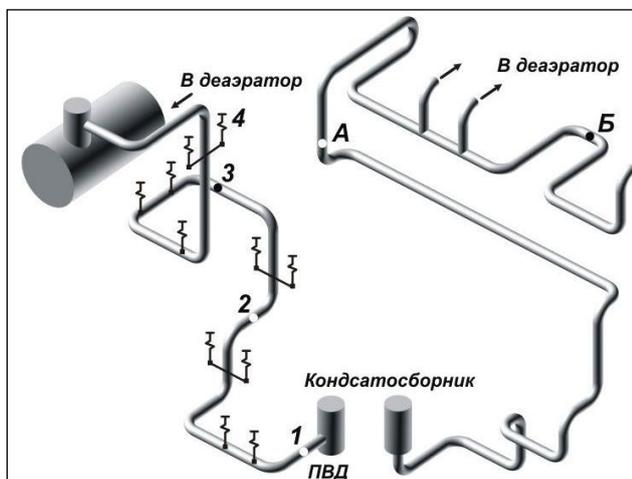


Рисунок 2.2 Схема дренажных конденсатопроводов, 1 – 3 – места установки датчиков давления; 4 – пружинная подвеска; А, Б – места установки датчиков вибрации.

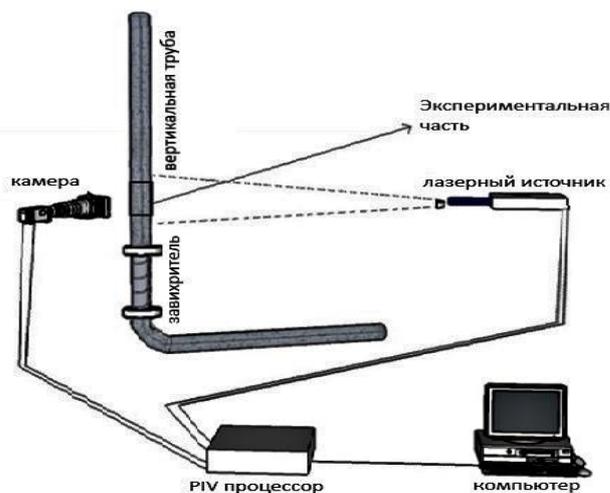


Рисунок 2.3 Схема измерительного комплекса «Полис» в составе лазерной установки, приемной камеры, синхронизатора, ПЭВМ-

На рисунке 2.3. приведена схема установки с использованием лазерного PIV-метода (цифровая трассерная визуализация – оптический метод измерения мгновенных полей скорости жидкости или газа в выбранном сечении потока),

В составе измерительного комплекса PIVметода:

- двойной импульсный Nd:YAG-лазер Quantel EVG с энергией в импульсе 145 МДж;
- объектив для формирования лазерного ножа;
- цифровая кросскорреляционная камера Видеоскан 4021 с разрешением 2048*2048 пикселей;
- широкоугольный объектив Nikon 28mm F/2.8D;
- синхронизирующий процессор;
- персональный компьютер с программным обеспечением Actual Flow.

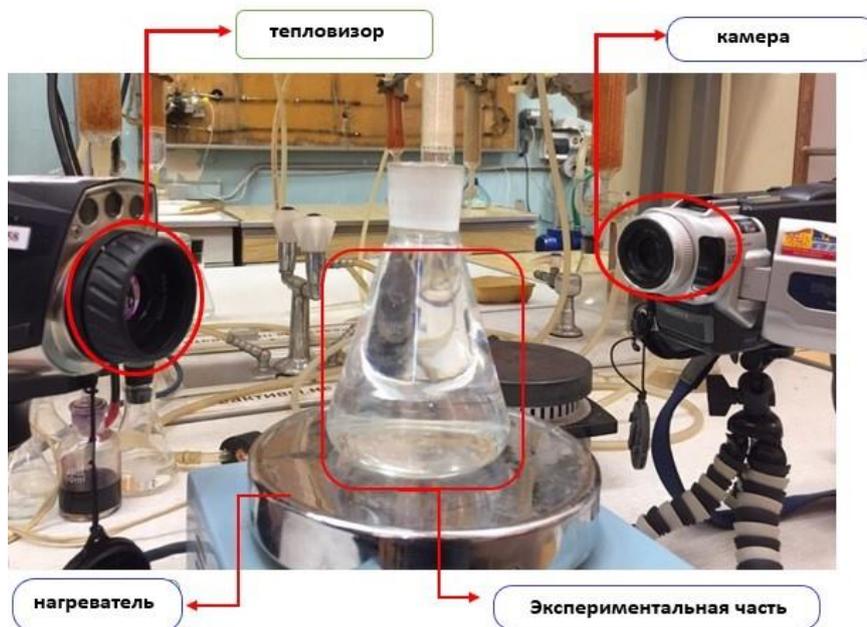
Импульсный лазер создавал тонкий световой нож и освещал мелкие частицы, взвешенные в исследуемом потоке. Характеристики экспериментальной стенда:

- фокусное расстояние оптической системы может меняться от 0,3 до 0,6 м;
- толщина лазерного ножа меняется от 0,5 до 3 мм.

Регистрация отраженных оптических импульсов осуществлялась кросскорреляционной камерой, которая предназначена для двукратной регистрации трассерных изображений в потоке и могла работать как в двухкадровом, так и в однокадровом режиме. Временная задержка между вспышками лазера при двухкадровом режиме регистрации кадров варьировалась от 10 мкс до 259 мс.

В главе описаны экспериментальные установки для исследований поведения перегретой жидкости при низкочастотном ударном воздействии в большом объеме (рис.2.4) и узком канале (рис.2.5). Установки имитируют потенциальную ситуацию в активной зоне ядерного реактора АЭС при сейсмических воздействиях.

Рисунок 2.4.
Экспериментальная установка для исследований низкочастотного воздействия на процесс вскипания перегретой жидкости



В ходе исследований использовались несколько мензурок в качестве объема экспериментального сосуда и также узкий канал. В качестве рабочей жидкости применялась чистая дистиллированная вода. Нагреватель был настроен на непрерывный подогрев с постоянной скоростью. Тепловизор использовался для измерения и визуализации температурных полей. Параллельно производились измерения температур перегреваемой воды хромель-копелевой X-K термопарой.

Рисунок 2.5. Стенд для исследования влияния низкочастотного ударного воздействия, на процесс кавитации теплоносителя в узком вертикальном канале



Для достижения высокого уровня перегрева жидкости в сосудах осуществлялась их очистка от центров кристаллизации с использованием специальных химических смесей: царская водка – смесь азотной и соляной кислот, в молярном соотношении 1:3 (желто-оранжевая дымящаяся жидкость с высокими растворяющими свойствами).

Анализ погрешностей был представлен в соответствии с ГОСТ Р 8.568-97 "Аттестация испытательного оборудования" и ГОСТ 25021.3-83 "Установки испытательные вибрационные электродинамические».

В главе 3 дан анализ сейсмической обстановки и её потенциальное влияние на безопасность для площадки строящейся атомной электростанции в горной стране. Республика Бангладеш находится в зоне повышенной геотектонической активности: за длительный период наблюдений в Бангладеш и на территории соседних государств: Индия, Мьянма, Непал, имели место несколько тысяч сейсмических явлений.

Геологическое обследование районов Бангладеш и историческая информация о землетрясениях позволили разработать карту макросейсмического районирования страны. По результатам макросейсмического районирования (рис.3.1) площадка строительства АЭС "Руппур" находится в зоне II с вероятным пиковым ускорением грунта (PGA) 0,05 g.

Из графика (рис.3.2) видно, что даже для наиболее сильного из зафиксированных и близко расположенных очагов землетрясений (Мадупур) интенсивность сейсмического воздействия на площадке АЭС Руппур не превышает 8 баллов по шкале MSK 64.

Для условий Бангладеш наиболее точные результаты для определения PGA (пикового ускорения грунта) дает эмпирическое уравнение Дугалла:

$$PGA = 227.38 * 10^{0.308M} (r + 30)^{-1.201} \text{ CM/C}^2, \quad (3.1)$$

Где M - магнитуа землетрясения (по шкале Рихтера), r - эпицентральное расстояние (в км).



Рисунок 3.1 Карта макросейсмического районирования Бангладеш

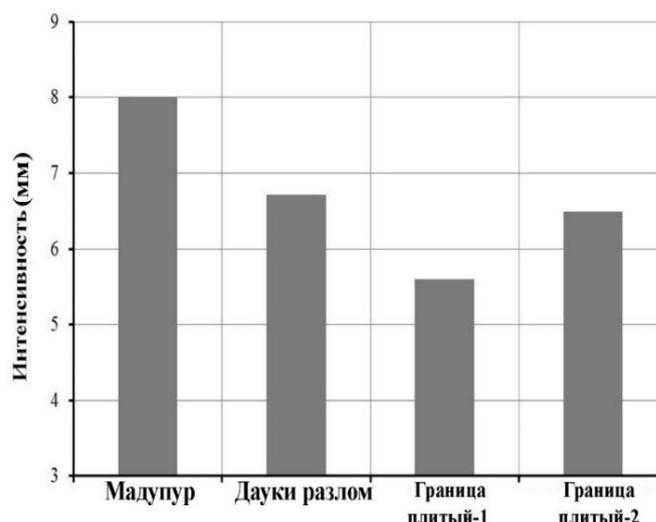


Рисунок 3.2. Интенсивности сейсмического воздействия на площадке размещения АЭС «Руппур» в зависимости от исходного события.

При оценке интенсивности используются эмпирические соотношения между I , магнитудой M и расстоянием до очага для базового (эталонного) грунта :

$$I = a * M - \gamma * \lg R + C, \quad (3.2)$$

Где M – магнитуда землетрясения (по шкале Рихтера), $R = \sqrt{(r^2 + h^2)}$ гипоцентрального расстояния (в км), $a=1,5$; $\gamma=3,5$; $c=3$ – коэффициенты для базового (эталонного) грунта. В главе показана расчетная схема глубинного землетрясения (рис.3.3.)

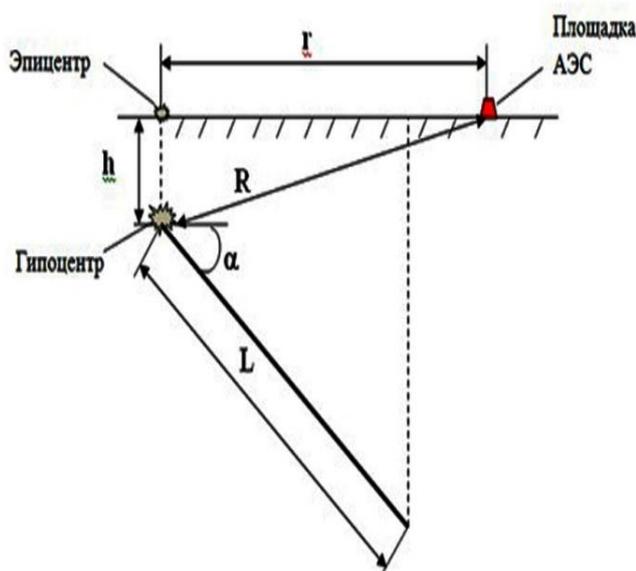


Рисунок 3.3 Расчетная схема глубинного землетрясения. h - глубина гипоцентра, км; L -длина линии разлома, км; угол наклона, гр.; r - эпицентральное расстояние до АЭС, км; R - гипоцентрального расстояние до АЭС, км.

В заключении 3-й главы показано, что сооружение АЭС «Руппур» - единственный способ радикального улучшения энергообеспечения Бангладеш в наиболее короткие сроки. Российский проект АЭС с реактором ВВЭР 1200 (3+) имеет все необходимые компоненты для эффективной сейсмической защиты

оборудования и позволяет обеспечить безопасные условия эксплуатации при реальной сейсмической обстановке.

В главе 4 представлены результаты экспериментов на исследовательских стендах по анализу виброхарактеристик, эффективности пассивных завихрителей; исследования с использованием PIV-метода; результаты исследований влияния низкочастотных колебаний, имитирующих воздействие во время землетрясения на поведение перегретой жидкости в большом объеме и узком канале.

Моделирование двухфазного потока осуществлялось путем создания напора воды циркуляционным насосом и подачей воздуха от компрессора. Емкость бака составляла 2000 литров, манометр позволял измерить показания в диапазоне 1-100 Па.

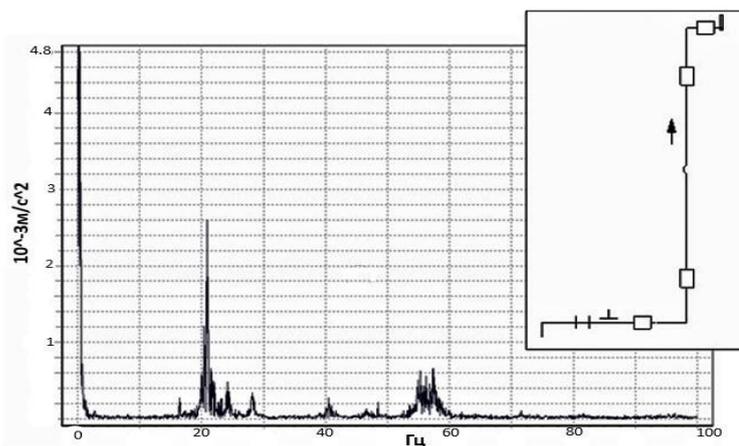
В задачу исследования входило выявление зависимости виброхарактеристик трубопровода (виброскорость, виброускорение, виброперемещение) от расхода и паросодержания двухфазного потока для различных участков трубопровода и с различными типами вставок-завихрителей. Измерения выполнялись с использованием виброанализатора СД-12М, пьезо- датчики размещались на критических участках «до» и «после» поворотных участков, что позволило построить спектры относительной дисперсии виброперемещений. Исследованные динамические напряжения в металле трубопровода имели максимальное значение на частоте 12,4 Гц и составляли 12,7 МПа.

При анализе собственных частот в проектной и рабочей линии нагрузки возникли значительные трудности из-за отсутствия информации об источниках пульсации давления.

Проведя измерение вибрации с помощью виброанализатора СД-12 М, было показано, что вероятность возникновения резонанса достаточно велика. Спектры собственных акустических частот и частот собственных колебаний оборудования являются достаточно плотными, и близость некоторых частот этих двух спектров может привести к акустомеханическому резонансу, что недопустимо в трубопроводах. При проектировании трубопроводов для уменьшения виброперемещений стоимость будет немного увеличена за счет внедрения нового устройства-завихрителя, но в то же время это обеспечит повышение ресурса, межремонтных сроков и безопасности всей станции в целом.

На рисунке 4.1 представлена частотная характеристика трубопровода для восходящего участка двухфазного потока экспериментального стенда. Видно, что максимальная частота соответствует 0,5 Гц, первая гармоника возникает на частоте 21 Гц, а последующая на частоте 55 Гц.

Рисунок 4.1. Шумовая характеристика спектра колебаний трубопровода экспериментального стенда.



В технологическом процессе совместное течение пара и воды наблюдается во многих трубопроводных участках. Прежде всего, это трубопроводы, связанные с испарением и конденсацией: парогенераторы, испарители, конденсаторы и теплообменники, а также узлы регенеративной схемы турбины: трубопроводы дренажей греющего пара, технологических отборов, систем разогрева и пуска основного оборудования. Двухфазные течения в результате коррозионно-эрозионно-вибрационных воздействий, со временем приводят к серьезным повреждениям оборудования.

Для снижения целого комплекса указанных недостатков применяются различные способы воздействия на поток.

Все исследуемые завихрители имели форму цилиндрического тела с примыкающими к нему двумя фланцами на торцах для того, чтобы интегрировать вставку в трубопровод. Внутренняя поверхность исследуемых завихрителей содержала развитую структуру (наплавка, винтообразные направляющие либо ряд канавок) и решала задачу пассивного управления (закручивания) движущегося потока. При этом, гидравлическое сопротивление при различных внутренних конструкциях вставок, было разное. Искомым техническим результатом исследований вставок-завихрителей на стендах явилось повышение эффективности перемешивания потока жидкости при одновременном снижении гидравлического сопротивления и выравнивания скоростей потока по сечению трубопровода для снижения градиента давления и, тем самым, уменьшения виброперемещения трубопровода.

Показания, снятые с манометра, заносились в таблицы данных. По этим данным строились зависимости коэффициента сопротивления λ от числа Рейнольдса (Re). Обобщенный график всех серий экспериментов приведен на рис.4.2. Гидравлические характеристики вставок-завихрителей определялись по измерениям перепада давления в уравнении Дарси-Вейсбаха для однофазного потока:

$$\xi = 2 \left(\frac{d}{L} \right) \left(\frac{\Delta p}{\rho U_0^2} \right), \quad (4.1)$$

где ξ - коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) вставки; d и L – гидравлический диаметр и длина вставки.

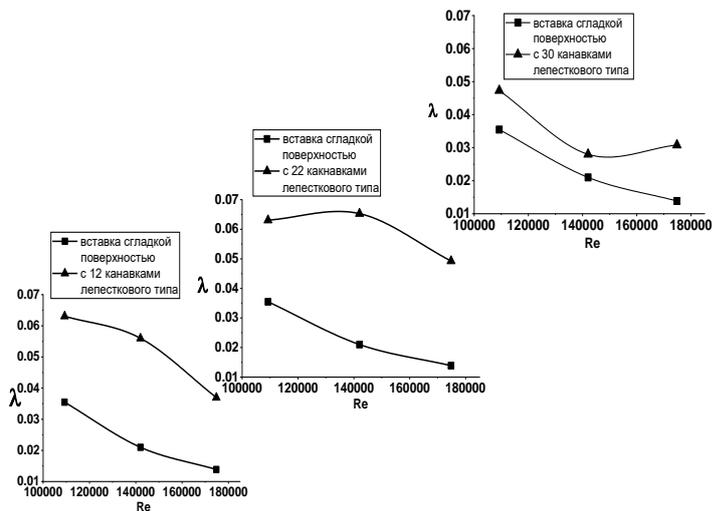
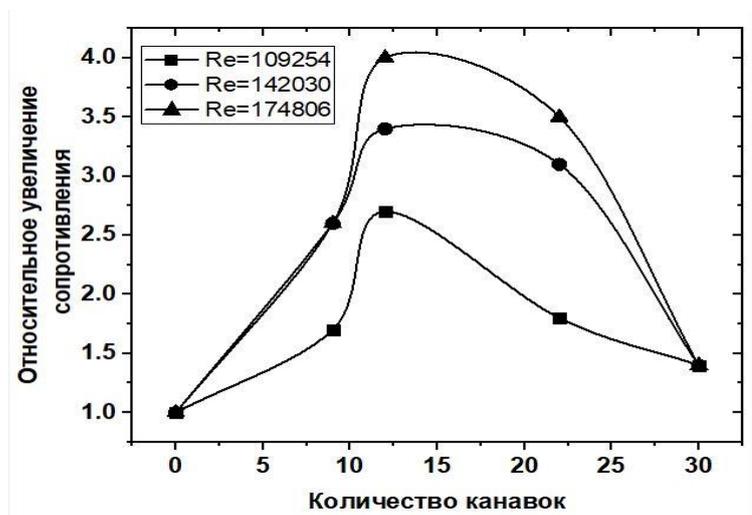


Рисунок 4.2. Зависимость коэффициента сопротивления λ от числа Рейнольдса Re между вставкой с гладкой поверхностью и вставкой лепесткового типа с 12, 22 и 30 канавками

На рисунке 4.3 представлены результаты первичной обработки данных эксперимента.

Рисунок 4.3 Относительное изменение гидравлического сопротивления



В ходе исследований было показано, что наименьшим гидравлическим сопротивлением обладают вставки-завихрители с отсутствием внутренних выступающих элементов и с развитой поверхностью на стенке. (рис.4.3).

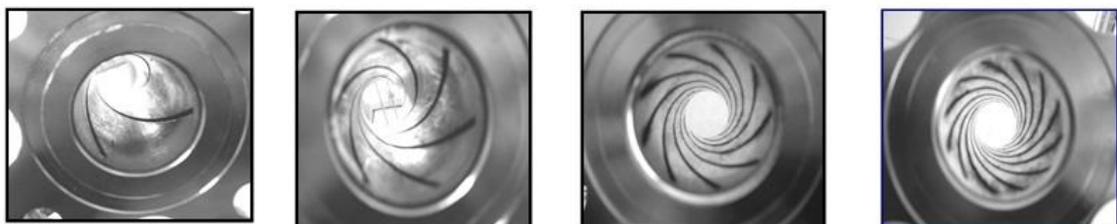


Рисунок 4.4. Завихрители с тремя, 6-ю, 9-ю и 12-ю эвольвентными

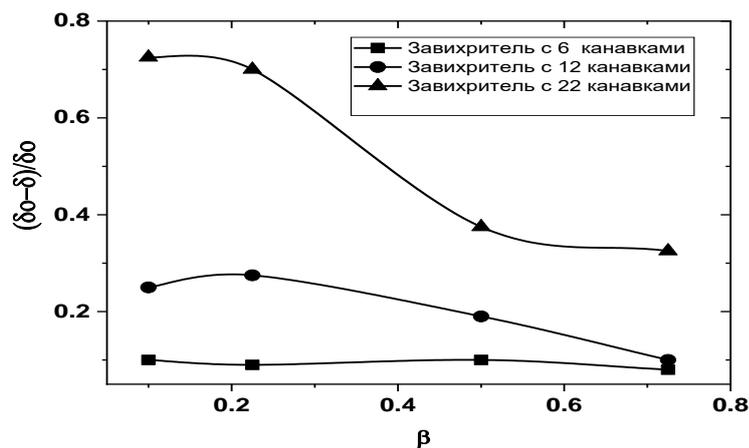
аппроксимировались в виде среднеквадратичных значений (СКЗ) виброперемещений участка трубопровода с различными вставками-завихрителями δ по отношению к соответствующим значениям СКЗ для гладкой вставки δ_0 в виде:

$$\frac{\delta}{\delta_0} = 1 - 6,75 Re_d^{-0,15} \beta^{-2\epsilon} \epsilon; Re = \frac{4G}{\pi d v}, \quad (4.2)$$

Относительные величины СКЗ вибраций трубопроводов опытного стенда в зависимости от газосодержания потока и типа вставки-завихрителя представлены на рисунке 4.4.

Анализ результатов измерений (рис.4.5) и их статистическая обработка показали, что эвольвентные вставки-завихрители являются достаточно эффективными пассивными устройствами, позволяющими при сравнительно малом гидравлическом сопротивлении снизить уровень виброперемещения трубопроводов с двухфазными потоками в 1,5-2 раза. После монтажа экспериментального стенда, разработки и изготовления различных конструкций завихрителей были проведены исследования статических виброхарактеристик трубопровода при различных режимах течения потока с использованием вставок.

Рисунок 4.5.
Относительные величины СКЗ вибраций трубопроводов опытного стенда в зависимости от газосодержания потока и типа вставки-завихрителя при $Re = 4 \times 10^4$; 1,2,3 – завихрители с 6, 12 и 22 канавками



На этапе исследования характеристик вибраций трубопровода с каждым типом вставки было проведено несколько сот экспериментов, получены первичные данные и на их основе построены графики зависимости эффективности снижения виброхарактеристик от типа вставки, паросодержания двухфазного потока при различных числах Рейнольдса.

Кроме того, в **главе 5** представлен комплекс исследований канатовидного завихрителя на вибродиагностическом стенде, выполнены исследования с применением лазерного метода измерения скорости частиц (PIV).

Для визуализации структуры потока после «Завихрителя» и поворотного участка, возникла необходимость в создании и монтаже нового экспериментального стенда - лазерной велосимметрии с использованием оптического метода измерения мгновенных полей скорости жидкости или газа в выбранном сечении потока. Примененный метод исследования с использованием лазера и фотокамеры называется «Метод PIV» (цифровая трассерная визуализация). Комплекс «Полис», реализующий данный метод, разработан в Сибирском отделении РАН (рис.5.1).

С целью верификации полученных результатов и анализа эффективности различных завихрителей, как уже отмечалось, был использован PIV-метод. На рисунке 5.2 представлена фотовизуализация закрутки потока жидкости ($f=0$) после прохождения вставки-завихрителя и использованием данного метода. Наконец, в главе 5, стояла задача изучить влияние низкочастотных сейсмических явлений на процесс перегрева и кипения, а также кавитацию теплоносителя в небольшом

объеме. Для исследования влияния низкочастотных колебаний на перегретую (свыше 100°C) жидкость была разработана экспериментальная установка в главе 2.

Эксперимент имитирует возможную ситуацию в активной зоне ядерного реактора в отсутствии циркуляции теплоносителя. В эксперименте в качестве последнего использовалась дистиллированная вода. Температура жидкости регистрировалась во время нагрева (и перегрева) как с отсутствием, так и при наличии низкочастотных колебаний (имитация сейсмического воздействия) (рис. 5.4-5.6).



Рисунок 5.1. Экспериментальная установка «Полис» (PIV Метод)

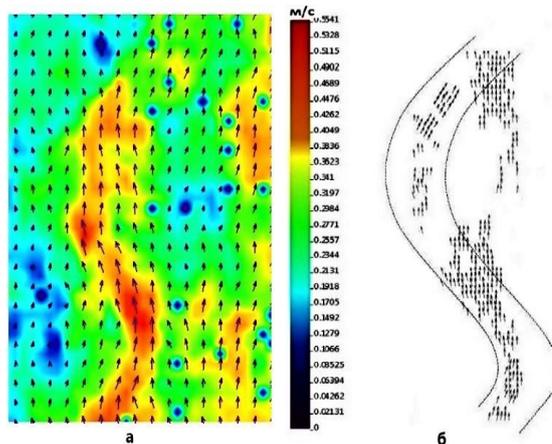
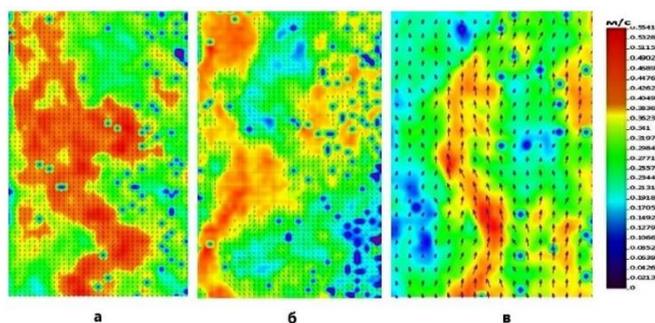


Рисунок 5.2. а - Фотовизуализация закрутки потока жидкости при отсутствии газа ($f=0$) после прохождения вставки-завихрителя. б - Трассер вектора скоростей течения теплоносителя после прохождения вставки завихрителя на участке $L= 0 -15$ см

Рисунок 5.3. Сравнительная векторная визуализация закрутки потока при его прохождении через разные вставки а- с 12 канавками; б - с 22 канавками; в - с 30 канавками



Взрыв пара из-за кавитации в жидкости может оказать непредсказуемое разрушительное воздействие на оборудование активной зоны реактора (оболочки ТВЭЛ, дистанционирующие решетки ТВС, выгородка), при отсутствии циркуляционного охлаждения. Это может привести к расплавлению активной зоны.

Для рассмотрения воздействия низкочастотных колебаний в узких каналах был разработан и смонтирован стенд (представлен в главе 2, рисунок 2.5). Из эксперимента следует вывод, что низкочастотное воздействие оказывает усугубляющее влияние на процесс кавитации: перегрев инициирует пузырьки пара и любое низкочастотное воздействие способствует ускорению парового выброса.

Температура в ходе эксперимента фиксировалась также с помощью тепловизора. В ходе эксперимента осуществлялось воздействие на сосуд ударами низкой частоты, что приводило к последующему повышению температуры и, одновременно, к резкому выбросу пузырьков – взрыву пара. Процесс парообразования и выброса фиксировался на скоростную видеокамеру (изображение представлено на рисунках 5.4 и 5.5).



Рисунок 5.4. Фото процесса вскипания (взрыва) перегретой жидкости при $t=108^{\circ}\text{C}$

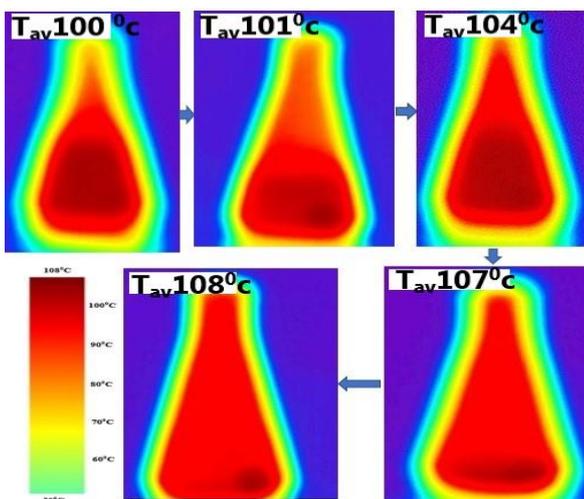


Рисунок 5.5. Термограмма зон при стационарном исследовании перегретой жидкости

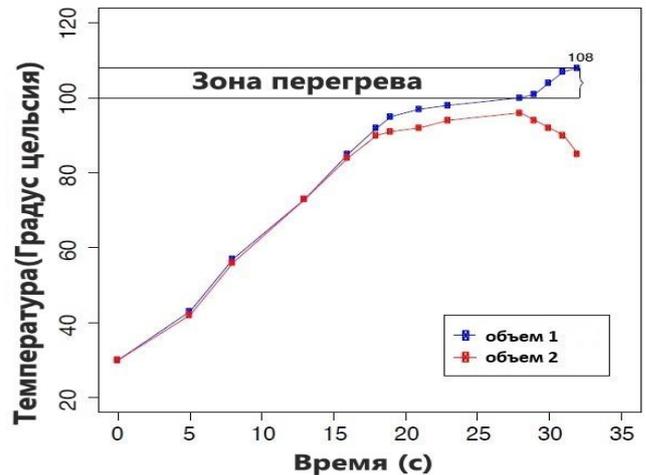


Рисунок 5.6. Сравнение температуры и влияния низко частотного воздействия на процесс вскипания перегретой жидкости



Рисунок 5.7. Фотофиксация взрыва в узком канале с перегретой жидкостью

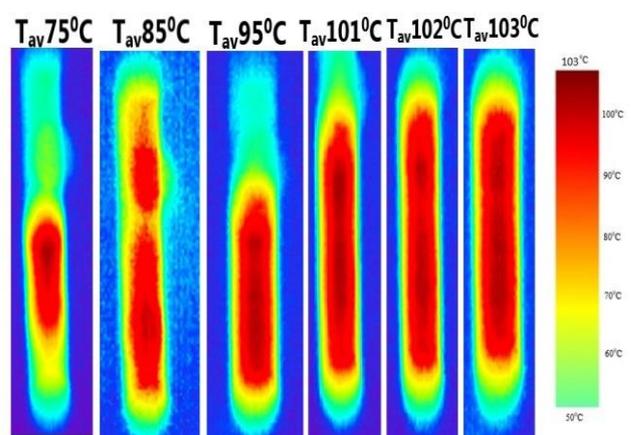


Рисунок 5.8. Изменение температуры перегретой жидкости в узком канале

В **Заключении** приведены основные результаты работы:

1. Сооружение АЭС «Руппур» - единственный способ радикального улучшения энергообеспечения Бангладеш в короткие сроки для наиболее сильного из потенциальных и близко расположенных очагов землетрясений (Мадупур), где интенсивность сейсмического воздействия на площадке АЭС не превышает 8 баллов по шкале MSK 64.
2. Анализ сейсмической ситуации для вопросов безопасности относительно планируемой площадки проекта атомной электростанции в Бангладеш продемонстрировал, что наибольшие воздействия на площадку размещения АЭС находятся в диапазоне периодов колебаний грунта от 0,1 до 10 сек, с пиками ускорений в диапазоне от 0,8- 2 сек; скоростей от 2 до 3 сек; перемещений от 2 до 8, что свидетельствует о потенциально опасном низкочастотном характере воздействия на расположенные на площадке объекты.
3. Разработаны и внедрены 4 экспериментальных стенда для исследования воздействия низкочастотных колебаний (имитация землетрясения) на состояние трубопроводов энергетического оборудования.
 - вибродиагностический стенд;
 - лазерный стенд цифровой трассерной визуализации- PIV Метод;
 - экспериментальный стенд исследования влияния низкочастотного воздействия на процесс вскипания теплоносителя в объеме;
 - экспериментальный стенд исследований поведения перегретой жидкости в узком канале.
4. Исследованы спектры виброхарактеристик (виброперемещения, виброускорения, виброскорости) трубопроводов при различных режимах течения двухфазного потока с использованием разных типов завихрителей. Получены результаты, характеризующие эффект использования завихрителей в трубопроводах с двухфазным течением: снижение виброперемещения до 25-40% при среднеквадратичной ошибке 15%.
5. С помощью лазерного сканирования (PIV-метод) получены распределения скоростей в прямолинейных и различных поворотных участках трубопровода, определены условия вихреобразования и возникновения градиента давлений на внешние и внутренние стенки в поворотных участках, что дает возможность верификации расчетных моделей при решении задачи пассивного управления (снижения) виброперемещения трубопроводов энергетического оборудования и повышения надежности и безопасности эксплуатации его в целом.
6. Экспериментальные исследования показали, что низкочастотные ударные воздействия ведут к интенсивному кавитационному вскипанию перегретого теплоносителя (воды), причем уровень перегрева зависит от размера каналов, содержащих жидкость.
7. В результате температурных измерений перегретой жидкости во время экспериментов, направленных на определение воздействия ударов на процесс вскипания показано, что при отсутствии циркуляции теплоносителя максимальный перегрев соответствовал температуре 108 °С (на 8 градусов

выше температуры кипения), а для исследований вскипания перегретой жидкости в узком канале соответствовал температуре 103 °С (на 3 градуса выше температуры кипения). В обоих случаях низкочастотные воздействия (потенциальные землетрясения) приводили к снижению температуры вскипания теплоносителя, что характеризует возрастание опасности в случае землетрясения и требует применения дополнительных устройств для снижения виброперемещений оборудования и трубопроводов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Хоссейн, И. К вопросу сейсмической опасности при выборе площадки для строительства АЭС в Бангладеш / **И. Хоссейн**, М.Ш. Акбар, В.И. Велькин, С.Е. Щеклеин // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2018. – Т. 2018 № 3. – С. 30-40; 0,69 п.л. / 0,2 п.л.

Hossain, I. seismic safety evaluation during site selection for the nuclear power plants in Bangladesh / I. Hossain, M.S. Akbar, V. I. Velkin, S. Y. Shcheklein // Nuclear Energy and Technology. – 2018. – 4(4). – P. 251-256. doi.org/10.3897/nucet.4.31873; 0,38 п.л. / 0,2 п.л.

2. Hossain, I. Experimental study in reduction of two phase flow induced vibration / **I. Hossain**, V. I. Velkin, S. E. Shcheklein // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 211. – P. 1-6; 0, 38 п.л. / 0, 13 п.л. (Web of Science и Scopus).

3. Hossain, I. The study of passive vibration dampers in pipelines using PIV-methodology for single phase flow / **I. Hossain**, V. I. Velkin, S. E. Shcheklein // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2017. – Vol. 224. – P. 565-570; 0, 38 п.л. / 0, 20 п.л. (Web of Science и Scopus).

4. Hossain, I. Comparative evaluation of renewable energy scenario in Ghana / E.B. Agyekum, V.I. Velkin, **I. Hossain** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 643, Issue 1. – P. 1-7; 0, 48 п.л. / 0, 13 п.л. (Scopus).

5. Hossain, I. Investigation of the effect of passive vortex inserts of different geometrical shapes on the vibrations reduction efficiency in pipelines with two-phase flow / V. I. Velkin, S. E. Shcheklein, **I. Hossain**, A. Nikitin, G. Chikansev // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 115. – P. 1-4; 0, 25 п.л. / 0, 20 п.л. (Scopus).

Публикации в других изданиях:

6. Hossain, I. Project Development of an Underground Nuclear Power Plant on the Basis of the Integrated Ship Reactor, KN-3 / **I. Hossain**, Ya. Asiptsov, V.I. Velkin, S.E. Shcheklein // KnE Materials Science. ASRTU Conference on

Alternative Energy, Sino-Russian ASRTU Conference Alternative Energy: Materials, Technologies, and Devices. – 2018. – P.118-124. 0, 43 п.л. / 0, 34 п.л.

7. Hossain, I. The Prospects for Nuclear Energy and Problems of Development in Bangladesh. Analysis of Parameters of Seismic Hazard / **I. Hossain**, S.E. Shcheklein and V.I. Velkin // В сборнике материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции с международным участием и выставки работ студентов, аспирантов и молодых ученых “Энерго-и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии” Екатеринбург. – 2015. – С. 474-475; 0,13 п.л. / 0,10 п.л.

8. Hossain, I. Analysis of Bangladesh Nuclear Infrastructure Required for Building of First NPP/ **I. Hossain**, O.L. Tashlikov // В сборнике: Труды научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Уральский энергетический институт. – 2016. – С. 282-285; 0, 25 п.л. / 0, 13 п.л.

9. Hossain, I. Investigation of thermal Hydraulic Vibration problems for a Nuclear Reactor and an analysis of Vortex Shedding / **I. Hossain**, S.E. Shcheklein, V.I. Velkin // Электронный научный журнал «Наука и перспективы». – 2016. – № 2. – С. 1-4; 0, 25 п.л. / 0, 13 п.л.

10. Hossain, I. The problem of the establishment of necessary infrastructure for the countries first NPP (Bangladesh) / **I. Hossain**, O.L. Tashlikov // VII All Russia Science and Technology Conference, XVII School of Young Scientists. Safety of critical Infrastructures and Territories. – 2016. – P. 185-188; 0, 25 п.л. / 0, 21 п.л.

11. Hossain, I. Seismic safety evaluation during site selection for the nuclear power plants in Bangladesh / **I. Hossain**, S.E. Shcheklein, V.I. Velkin // VII All Russia Science and Technology Conference, XVII School of Young Scientists. Safety of critical Infrastructures and Territories. – 2016. – P. 235-238; 0, 25 п.л. / 0, 13 п.л.

12. Hossain I. The decrease in vibration of pipelines with the use of passive devices / **I. Hossain**, S.E. Shcheklein, V.I. Velkin // VII All Russia Science and Technology Conference, XVII School of Young Scientists. Safety of critical Infrastructures and Territories. – 2016. – P. 260-262; 0, 19 п.л. / 0, 10 п.л.

13. Хоссейн, И. Влияние пассивных устройств на снижение вибрации трубопроводов с двухфазным потоком в энергетическом оборудовании / **И. Хоссейн**, С.Е. Щеклеин, В.И. Велькин // Journal of European accreditation of Engineering Programs. – 2016. – С. 213-215; 0, 19 п.л. / 0, 10 п.л.

14. Хоссейн, И. Экспериментальный стенд для исследований способов снижения вибрации в трубопроводах с двухфазным потоком / **И. Хоссейн**, С.Е. Щеклеин, В.И. Велькин // Journal of European accreditation of Engineering Programs. – 2016. – С. 226-228; 0,19п.л./ 0, 10 п.л.

15. Hossain, I. Analysis of the Effectiveness of Passive Control Devices for Vibration of the Pipelines with Two-Phase Coolant / **I. Hossain**, G. E. Chikantsev, V. I. Velkin // Перспективные энергетические технологии. Экология,

экономика, безопасность и подготовка кадров: материалы научно-практической конференции. – 2016. – С.180-183; 0,25 п.л./0,13 п.л.

16. Hossain, I. Seismic safety Evaluation During Site Selection for the Nuclear Power Plants in Bangladesh / **I. Hossain**, M. S. Akbar, V. I. Velkin, S. E. Shcheklein // Перспективные энергетические технологии. Экология, экономика, безопасность и подготовка кадров: материалы научно-практической конференции. – 2016. – С. 184-187; 0,25 п.л./ 0,13 п.л.

17. Hossain, I. Methodology for Particle Tracing in Fluid Flow Using Particle Image Velocimetry (PIV) / **I. Hossain**, V.I. Velkin // В сборнике: Труды второй научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Уральский энергетический институт. – 2017. – С. 227-229; 0, 19 п.л./ 0,10 п.л.

18. Chikansev, G. Experimental Stand for Reaserch of the Coolant Flow by Digital Tracer Imaging / G. Chikansev, A. Nikitin, S. Roman, **I. Hossain**, V.I. Velkin // В сборнике: Труды второй научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Уральский энергетический институт. – 2017. – С. 246-249; 0, 25 п.л./ 0,13 п.л.

19. Hossain, I. Energy Scenario and Regulatory Requirements for Nuclear Power Sector in Bangladesh / **I. Hossain**, O.L. Tashlikov // В сборнике: Труды второй научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Уральский энергетический институт. – 2017. – С. 373-376; 0, 25 п.л./0,13 п.л.

20. Велькин, В.И. Исследование влияния пассивных завихрителей различной геометрии на эффективность снижение вибрации в трубопроводах с двухфазным течением / В.И. Велькин, С.Е. Щеклеин, В.М. Пахалуев, **И. Хоссейн**, А.Д. Никитин, Г. Чиканцев, Р. Догарев // Всероссийская конференция «XXXIII Сибирский теплофизический семинар», Новосибирск, – 2017. – С.1-4; 0,25 п.л./0,13 п.л.