Боков Павел Андреевич. Исследование условий возникновения и характеристик кавитации в главных циркуляционных насосах реакторов на быстрых нейтронах, охлаждаемых ТЖМТ: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.14.03 / Боков Павел Андреевич;[Место защиты: Опытное конструкторское бюро "ГИДРОПРЕСС" - Федеральное государственное унитарное предприятие http://www.gidropress.podolsk.ru/ru/presscenter/news.php?news\_cid=60&news\_id=495].- Подольск, 2014

**НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

На правах рукописи

**Боков Павел Андреевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК КАВИТАЦИИ  
В ГЛАВНЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ НАСОСАХ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ  
НЕЙТРОНАХ, ОХЛАЖДАЕМЫХ ТЖМТ**

Диссертация

на соискание учёной степени кандидата технических наук

05.04.i1 - «Атомноє реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной

промышленности»

Научный руководитель -  
доктор технических наук, профессор  
Бєзносов А.В.

г. Нижний Новгород 2015 г.

Содержание

Перечень сокращений, условных обозначений 5

[Введение 6](#bookmark0)

[1. Аналитический обзор. Необходимость определения кавитационных характеристик тяжелых жидкометаллических теплоносителей 12](#bookmark2)

1. [Сущность явления кавитации 12](#bookmark3)
2. Специфические свойства ТЖМТ, влияющие на возникновение и развитие кавитации 16
3. Анализ опыта создания и эксплуатации насосов реакторных контуров со свинєц-

висмутовым теплоносителем отечественных атомных подводных лодок 18

1. [Постановка задач исследований 19](#bookmark6)
2. Стенды (установки) с ТЖМТ, созданные для исследовательских испытаний

кавитационных явлений 20

* 1. [Установки для определения и наличия газа в ТЖМТ в статических условиях 20](#bookmark8)
  2. Стенд 2009-302ФТ-НК с центробежным насосом НСЦ-05НГТУ для

экспериментального подтверждения отсутствия в ТЖМТ традиционной паровой (парогазовой) кавитации и наличие газовой кавитации 21

* 1. Стенды ФТ-3 и ФТ-3А с центробежным насосом НСЦ-04 НГТУ для исследований

кавитационных характеристик высокотемпературного свинцового теплоносителя 25

* 1. Стенд ФТ-4А для определения кавитационных явлений в проточной части осевого

насоса 33

* 1. Установка для проведения исследовательских испытаний моделей проточной части

ГЦНА РУ Брест -од-300 (стєнд ФТ-4 НГТУ) с осевым насосом НСО-01НГТУ 36

1. [Исследования наличия и состояния газа (газопаровых смесей) в ТЖМТ 54](#bookmark18)
   1. [Объемная прочность и ядра кавитации в ТЖМТ 54](#bookmark19)
   2. Экспериментальное определение наличия газа в объеме ТЖМТ в статических

условиях 54

* + 1. [Программа и методика экспериментов 54](#bookmark21)
    2. [Обсуждение результатов 55](#bookmark22)
    3. [Выводы 57](#bookmark23)
  1. Анализ исследования наличия газовой (газопаровой) фазы в пристенном слое и

объеме ТЖМТ с использованием ультразвука. Ультразвуковая кавитация в ТЖМТ 57

* + 1. Сущность метода исследований

58

* + 1. Экспериментальные исследования пристенного слоя ультразвуковыми датчиками

сдвиговых волн 66

* + 1. [Обсуждение результатов 68](#bookmark27)
    2. [Выводы 84](#bookmark28)
  1. [Исследования наличия газовой (газопаровой) фазы в пристенном слое и в потоке ТЖМТ с использованием метода «экспресс - замораживания» 86](#bookmark29)
     1. [Сущность метода исследований 86](#bookmark30)
     2. Обсуждение результатов 89
     3. Выводы 92

1. Экспериментальное подтверждение отсутствия в потоке ТЖМТ традиционной паровой (парогазовой) кавитации и наличие газовой кавитации на стенде 2009-302ФТ-

НК с центробежным насосом 94

* 1. [Сущность эксперимента 94](#bookmark31)
  2. Изменения характеристик в контуре ТЖМТ при возникновении и развитии процесса

кавитации 99

* 1. [Выводы 107](#bookmark34)

1. Экспериментальное подтверждение отсутствия в ТЖМТ традиционной паровой

(парогазовой) кавитации и наличие газовой кавитации на стендах ФТ-3 и ФТ-3А с центробежным насосом 108

* 1. [Сущность исследований кавитационных процессов тремя независимыми методами 108](#bookmark35)
  2. Определение характеристик кавитации в потоке ТЖМТ путем изменения высоты

всасывания насоса 111

* 1. Определение характеристик кавитации в потоке ТЖМТ путем вакуумирования

газовой системы контура 118

* 1. Изменение характеристик потока ТЖМТ в эжекторе (сопле Вентури) при развитии

кавитации 122

* 1. [Результаты ревизии проточной части насоса 124](#bookmark44)
  2. [Выводы 125](#bookmark45)

1. Экспериментальное исследование кавитационных явлений в проточной части

осевого насоса на стенде ФТ-4А 127

* 1. [Сущность эксперимента 127](#bookmark47)
  2. [Обсуждение результатов 128](#bookmark48)

6.3 Выводы

128

1. Кавитационные испытании осевого насоса в свинцовом теплоносителе на стенде

ФТ-4 НГ131ТУ 129

* 1. [Программа и методика испытаний 129](#bookmark51)
  2. Изменение характеристик проточной части, осевого насоса и контура в процессе

кавитационных испытаний 131

* 1. Результаты ревизии проточной части насоса после кавтационных испытаний и после

испытаний по определению напорной и энергетической характеристик (с уменьшенной высотой трубы постоянного напора насоса) 147

* 1. [Выводы 149](#bookmark49)

1. Обсуждение результатов и модель кавитации в потоке ТЖМТ применительно к

условиям главных циркуляционных насосов установок с реакторами на быстрых нейтронах. 150

* 1. [Методология исследования характеристик кавитации в ТЖМТ 150](#bookmark56)
  2. [Условия возникновения и характеристики кавитации в среде ТЖМТ 153](#bookmark57)
  3. Эрозионное и корозионно-эрозионное разрушение элементов конструкций в потоке

ТЖМТ 154

[Заключение 166](#bookmark60)

[Список использованных источников 167](#bookmark61)

Приложение А Техническое решение по укорочению вала ГЦНА РУ СВБР-100 совещания в ОАО «АКМЭ-инжиниринг» 173

Приложение Б в

176

Перечень сокращений, условных обозначений

ГСП - гидростатический **подшипник** ЭУ - экспериментальный участок

ТДАК - термодинамическая активность кислорода

ТЖМТ - тяжёлый жидкометаллический теплоноситель

ГЦН - главный циркуляционный насос

АЭС - атомная электрическая станция

РУ - реакторная установка

АПЛ - атомная подводная лодка

ПБ - плавильный бак

ПГ - парогенератор

ИО - инструкция **по** обслуживанию

МВ - мановакууметр

Hs - высота всасывания насоса, **мм**

п - число оборотов электродвигателя насоса, об/мин

**Рг** - давление газа **в** газовой системе контура, **кгс/см**2

**Рп** - давление насыщенных паров, **кгс/см**2

**Ркр** - давление газа **в** газовой системе, при котором происходит переход **к** газовой кавитации, **кгс/см**2 **Мкр** - крутящий момент, при котором происходит переход **к** газовой кавитации, **Н\*м** а - термодинамическая активность кислорода

Остальные обозначения **поясняются в** тексте

**Введение**

Создание и развитие ядерных энерго-технологий на первом этапе их освоения в середине прошлого века осуществлялось на базе военных разработок - технологий получения плутония для создания оружия и ядерных реакторов для атомных подводных лодок. В Советском Союзе была освоена единственная в мире технология проектирования, строительства и эксплуатации реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) - эвтектикой свинец-висмут для атомных подводных лодок с уникальными характеристиками (АПЛ проектов 645, 705 и 705К).

Переход к использованию реакторов на быстрых нейтронах, при замыкании топливного цикла, позволяет ядерной энергетике принять на себя весь требуемый (по прогнозам WEC) прирост электро-производства в течение ближайших десятилетий. При этом автоматически выполняются требования Киотского протокола и стабилизируются на любом заранее заданном уровне выбросы парниковых газов, связанные с электроэнергетикой [і]. Европейское сообщество интенсивно продвигает работы по созданию ускорительно управляемых систем с жидкометаллическими мишєнями, в которых используется эвтектический сплав свинец-висмут для трансмутации долгоживущих радионуклидов и для других целей [2 - 4]. Повышение требований к безопасности и надежности работы ядерных реакторов побуждают к поиску новых теплоносителей, обладающих преимуществами по сравнению с традиционными (вода, натрий и др.). Одним из таких теплоносителей является жидкий свинєц. Жидкий свинєц по своим Физико-химичєским свойствам Близок к эвтектическому сплаву свинец-висмут, с которым накоплен Большой опыт работы не только в условиях лаборатории, но и в промышленности.

Разрабатываются проекты быстрых реакторов, охлаждаемых свинцовым и свинєц- висмутовым теплоносителями, показавшие перспективность этого направления в плане создания реакторов повышенной безопасности и экономичности [5, 6]. Создаваемые проекты требуют обоснования проектных решений и среди них проведения ряда экспериментальных исследований по уточнению расчетных методик проточных частей лопастных насосов.

**Актуальность темы работы.** Процессы кавитации в потоке тяжелого

жидкометаллического теплоносителя в главных циркуляционных насосах контуров инновационных установок с реакторами на быстрых нейтронах определяют ресурсную работоспособность ГЦН, что в свою очередь определяет безопасность и экономичность РУ. Кавитационные явления могут возникать в других элементах реакторного контура, влияя на их работоспособность. Физические свойства ТЖМТ существенно отличаются от свойств традиционных теплоносителей, кавитационные характеристики ТЖМТ до выполнения настоящей работы практически не были исследованы. Создаваемые в РФ, в настоящее время, проекты БРЕСТ-ОД-300 и СВБР-100 проектные решения их ГЦН требуют обоснования. Отсутствие обоснованных кавитационных характеристик ТЖМТ усложняет и удлиняет сроки создания оптимальных технических решений ГЦН для РУ с этими теплоносителями. Имеющиеся расчетно-теоретические исследования процессов кавитации в свинцовом теплоносителе вследствие принимаемых допущений не могут быть использованы в инженерной практике.

**Целью диссертационной работы** является определение условий возникновения и характеристик (максимальная высота всасывания, кавитационный запас) кавитации в потоке тяжелого жидкометаллического теплоносителя реакторных установок (свинца и эвтектики свинец-висмут) при возможных эксплуатационных состояниях теплоносителя и контура на основе комплексных экспериментальных и теоретических исследований кавитационных характеристик лопастных (центробежных и осевых) насосов, включая анализ и обобщение полученных ранее данных по наличию газовой фазы в потоке и возникновению паровых пузырей тяжелого жидкометаллического теплоносителя.

**Задачи работы.** Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

* проведение анализа накопленного в исследуемой области информационного материала;
* расчетно-теоретический анализ специфических свойств ТЖМТ, влияющих на кавитационные процессы;
* разработка и создание экспериментальных стендов и установок с ТЖМТ с температурой до 550оС и расходом до 2000т/час;
* экспериментальное определение условий возникновения и характеристик кавитации в потоке высоко-температурного ТЖМТ и ее типа применительно к условиям контуров с реакторами на быстрых нейтронах;
* разработка и отработка методов измерения и компьютерной обработки информационных сигналов с датчиков температуры, термодинамической активности кислорода в ТЖМТ и др., расчета и представления исследуемых параметров в режиме реального времени;
* разработка, создание и испытание проточных частей двух центробежных и двух осевых насосов (конструкции НГТУ), в составе четырех различных стендов с высокотемпературным ТЖМТ;
* проведение экспериментальных исследований наличия газовой фазы в свинцовом теплоносителе.

**Научная новизна работы** заключается в определении явления газовой кавитации в ТЖМТ, в разработке методических основ проведения кавитационных испытаний, в получении массива экспериментальных данных по определению кавитационных характеристик ТЖМТ.

Впервые проведены комплексные иследования кавитационных процессов на модели проточной части ГЦН РУ БРЕСТ-ОД-300 в контуре со свинцовым теплоносителем при расходах ок. 150 м3/ч, температура 440-550оС и термодинамически активного кислорода в свинцє в диапазоне 10"5...100. Экспериментально было доказано отсутствие традиционной кавитации и наличие т.н. газовой кавитации в насосах, перекачивающих свинцовый теплоноситель в условиях контуров с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемых ТЖМТ.

**Достоверность и обоснованность результатов** обеспечивается использованием натурных ТЖМТ с натурными температурами, скоростями потока и другими характеристиками и использованием современных средств проведения экспериментов, использованием сертифицированного программного обеспечения при проведении экспериментов, соответствием полученных результатов общепринятым физическим представлениям, удовлетворительным совпадением результатов расчетных и экспериментальных данных установок различной конструкции, с различными методиками экспериментов, с центробежными и осевыми насосами.

**Практическая значимость работы:** Результаты работы явились обоснованием существенного (более чем на 2м) уменьшения проектной длинны вала ГЦН РУ СВБР-100. Результаты экспериментальных и расчетно-теоретических данных работы использованы для обоснования проектных и эксплуатационных решений ГЦН РУ БРЕСТ-ОД-300. Ряд научных положений, выводов и заключений работы вошел в курс «Насосы и газодувные машины АЭС» в НГТУ, и учебное пособие «Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике» - Нижний Новгород, 2012-536с.

**Основные положения, выносимые на защиту**

* Результаты анализа теоретических исследований свойств ТЖМТ, применительно к условиям ГЦН установок с реакторами на быстрых нейтронах, исключающие практическую невозможность возникновения традиционной паровой кавитации в потоке ТЖМТ.
* Методики проведения экспериментальных исследований процессов кавитации в установках (стендах) с натурными высокотемпературными (440-550оС) ТЖМТ при натурных скоростях, давлениях и других характеристиках при расходах теплоносителя от 20 до 1500т/час и скоростях до ок. 20 м/с.
* Разработанные экспериментальные установки (стенды) с натурным ТЖМТ для проведения исследований кавитационных процессов в ТЖМТ; установки для определения наличия содержания газа в ТЖМТ.
* Массив экспериментальных данных условий возникновения, характера и характеристик процессов кавитации в ТЖМТ, позволивших определять допустимую высоту всасывания и кавитационный запас ГЦН РУ с ТЖМТ. Эти данные позволяют более обоснованно разрабатывать проектную и эксплуатационную документацию ГЦН инновационных установок с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемых ТЖМТ.

- Экспериментальные исследования эрозионного разрушения элементов конструкций в потоке ТЖМТ.

**Личный вклад автора:** Исследования, результаты которых приводятся в настоящей работе, проводились на оборудовании и экспериментальных установках, смонтированных на базе кафедры «АТС» НГТУ им. Р.Е. Алексеева при непосредственном участии автора, автором лично или под его руководством. Автор принимал участие на всех этапах подготовки, проектирования, монтажа, отладки экспериментальных участков, оборудования, а также в разработке программ-методик, проведении исследований, обработки и обсуждении результатов. Подготовка диссертационной работы осуществлялась под научным руководством доктора технических наук, профессора Безносова Александра Викторовича.

В работе обобщены результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных на кафедре «АТС» НГТУ им. Р.Е. Алексеева автором самостоятельно и в соавторстве с д.т.н., проф. Безносовым А.В., инж. Серовым В.Е., доц. Боковой Т.А., асп. Маховым К.А., асп. Львовом А.В., асп. Зудиным А.Д. (НГТУ).

**Апробация работы и публикации:** Результаты работы докладывались на международных и отечественных конференциях и семинарах: «14-я Нижегородская сессия молодых ученых» (Нижний Новгород 2009г.); «9-я международная молодежная научно­техническая конференция Будущее технической науки» (Нижний Новгород 2009г.); «Реакторы на быстрых нейтронах» (Обнинск 2009г.); «7-я Курчатовская молодежно-научная школа» (Москва 2009г.); «18th International Conference On Nuclear Engineering (ICONE18)» (Китай, Ксиан 2010г.); «8-я Курчатовская молодежно-научная школа» (Москва 2010г.); «10-я международная молодежная научно-техническая конференция Будущее технической науки» (Нижний Новгород 2010г.); «15-я Нижегородская сессия молодых ученых» (Нижний Новгород 2010г.); «9-я Курчатовская молодежно-научная школа» (Москва 2011г.); «11-я международная молодежная научно-техническая конференция Будущее технической науки» (Нижний Новгород 2011г.); «16-я Нижегородская сессия молодых ученых» (Нижний Новгород 2011г.); «10-я Курчатовская молодежно-научная школа» (Москва 2012г.); «12-я международная молодежная научно-техническая конференция Будущее технической науки» (Нижний Новгород 2012г.); «Теплофизика-2012» (Обнинск 2012г.); «17-я Нижегородская сессия молодых ученых» (Нижний Новгород 2013г.); «11-я Курчатовская молодежно-научная школа» (Москва 2013г.); «13-я международная молодежная научно-техническая конференция Будущее технической науки» (Нижний Новгород 2013г.); «21st International Conference On Nuclear Engineering (ICONE21)» (Китай, Ченгду 2013г.).

Результаты исследований, выполненных автором лично или при его непосредственном участии, опубликованы в статьях в журнале «Атомная энергия» (і), в журнале «Ядерная энергетика» (6), в журнале «Вопросы атомной науки и техники» (3), в журнале «Вєстник машиностроения» (і). Получено 19 патентов, 8 из которых по теме диссертации. Всего опубликовано 37 печатных работ по теме диссертации.

Автор выражает благодарность д.т.н., профессору А.В. Безносову осуществлявшему научное руководство этой работой и предоставившему автору все условия для научной деятельности, коллективу кафедры «АТС» НГТУ за помощь в работе и заведующему кафедрой д.т.н., профессору Дмитриеву С.М. за поддержку в работе.

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения. Объем работы составляет 177 страниц, 105 рисунков, 3 таблицы, 2 приложения список использованных источников из 57 наименований, в том числе 27 работ автора.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе анализируется свойства ТЖМТ, влияющие на кавитацию, опыт создания и работы ГЦН РУ со свинец-висмутовым теплоносителем. Проводится теоретический анализ на основе которого делается вывод о невозможности возникновения традиционной кавитации в

гцн ру с тжмт.

Во второй главе приводится описание экспериментальных установок для проведения исследований кавитации, созданных автором лично под его руководством и при его непосредственном участии.

В третьей главе представлены экспериментальные и теоретические исследования наличия газовой фазы в ТЖМТ.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований кавитационных характеристик в циркуляционном контуре стенда 2009-302ФТ-НК с центробежным насосом, подтверждающие невозможность традиционной кавитации в условиях

ру с тжмт.

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований условий возникновения кавитации и кавитационных характеристик в циркуляционном контуре стенда ФТ-3 с центробежным насосом, позволившие обоснованно, тремя независимыми методами определить характеристики кавитационных процессов в ТЖМТ.

В шестой главе приведены результаты экспериментальных исследований условий возникновения кавитации и кавитационных характеристик в циркуляционном контуре стенда ФТ-4А с осевым насосом, подтвердившем невозможность традиционной кавитации.

В седьмой главе приведены результаты кавитационных испытаний моделей ГЦНА РУ БРЕСТ -од-300 на стенде ФТ-4 НГТУ с осевым насосом.

В восьмой главе представлен массив экспериментальных данных характеристики эрозионного воздействия потока ТЖМТ на конструкционные материалы в результате воздействия кавитации, а также специфичного взаимодействия потока ТЖМТ (с локальным понижением давления в нем) и несмачиваемой теплоносителем стенки конструкционного материала

**Заключение**

Анализ и теоретические исследования свойств ТЖМТ применительно к условиям ГЦН установок с реакторами на быстрых нейтронах показали практическую невозможность возникновения традиционной паровой кавитации в ТЖМТ.

Разработаны и созданы экспериментальные установки (стенды) для определения наличия газа в свинцовом и свинєц-висмутовом теплоносителе и для проведения исследований кавитации в ТЖМТ (два стенда с центробежными и два стенда с осевыми насосами) при температурах 420-550оС, с расходом ТЖМТ от 20 до 1500т/час.

Экспериментально подтверждено отсутствия традиционной паровой кавитации в условиях РУ с ТЖМТ.

Определены экспериментально, независимыми методами условия возникновения газовой кавитации в потоке свинцового теплоносителя (Р=0,4-0,5 кгс/см2(ата) при Т=440-480оС и окружной скорости рабочих колес осевого и центробежного насосов 10-12 м/с).

Определены экспериментально характеристики кавитации в ТЖМТ, что позволило определить максимальную высоту всасывания и кавитационный запас ГЦН РУ с ТЖМТ. В процессе кавитации в ТЖМТ, в отличиє от традиционной кавитации, «срыв» насоса не происходит. Его подача и напор монотонно уменьшаются с соответствующем уменьшением мощности электропривода насоса.

Показано, что имевшие место случаи эрозионного разрушения конструкционных материалов в потоке ТЖМТ могут возникать в результате «отхода» и последующего возврата с большей скоростью локального участка потока ТЖМТ к поверхности стєнки, несмачиваемой теплоносителем. Оптимальным методом предотвращения этого является исключение условий для «отхода» потока от стєнок за счет оптимальной геометрии канала и режимных параметров.

Результаты работы используются при разработке проектной и эксплуатационной документации ГЦН РУ СВБР-100 и БРЕСТ-ОД-300. (Согласно техническому решению совещания в АКМЕ-инжененринг длинна вала ГЦН РУ СВБР-100 уменьшена на 2,5 метра).