

УДК 621.039

А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.Д. Зудин, А.А. Козлов, А.Г. Мелузов, О.О. Новожилова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ОТРАБОТКА НАСОСОВ ДЛЯ ПЕРЕКАЧКИ СВИНЦОВОГО И СВИНЕЦ-ВИСМУТОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предмет, тема, цель работы: В НГТУ проводятся экспериментальные и расчетно-теоретические исследования, направленные на создание методики расчета осевых насосов для ТЖМТ, представленной в данной статье.

Метод или методологию проведения работы: В целях создания эмпирически обоснованных методик проектирования и расчета проточных частей насосов для перекачки ТЖМТ в НГТУ были проведены экспериментальные исследования, направленные на определение условий возникновения кавитации в среде ТЖМТ и ее характеристик, исследования влияния угла установки лопаток на характеристики рабочего колеса осевого насоса, а также характеристик центробежных насосов.

Результаты и область их применения: 1. Особенности физических характеристик ТМЖТ делают непригодным использование традиционных методов расчета и оптимального проектирования главных циркуляционных насосов этих установок. 2. Проведенные экспериментальные исследования проточных частей насоса осевого типа с различным количеством плоских лопастей и с различными углами установки лопастей позволили сделать выводы о влиянии угла установки лопатки на характеристики насоса. Оптимальный угол зависит от количества лопаток.

Выводы: В результате выполнения комплексной программы экспериментальных и расчетно-теоретических исследований предполагается разработка обоснованных методик расчета и оптимального проектирования лопаточных насосов, перекачивающих ТЖМТ.

Ключевые слова: тяжелые жидкометаллические теплоносители, насосопатка, угол установки, обоснование расчётных методик.

Введение

Ресурсная работоспособность контура ядерного реактора существенно зависит от характеристик главного циркуляционного насоса (ГЦН) контура. Главные циркуляционные насосы в контурах реакторов на быстрых нейтронах работают в специфических условиях физических параметров свинцового и свинец-висмутного теплоносителей. Область применения последних с относительной температурой $T_{раб} / T_{кип} = (300 - 600^\circ\text{C}) / (1600 - 1700^\circ\text{C}) = (0,2 - 0,3)$ и давлением насыщенных паров при рабочих температурах 10^{-18} - 10^{-8} ата качественно отличаются от аналогичных термодинамических характеристик традиционных теплоносителей: воды и натрия. Разница температур кипения для ТЖМТ (тяжелых жидкометаллических теплоносителей) и рабочих температур реакторного контура составляет 1000°C и более, тогда как для натрия эта величина составляет около 300°C , а для водяного теплоносителя – около 10°C и менее. Относительная разница температур застывания (плавления) и рабочих температур контура, отнесенная к температурам кипения в ТЖМТ, мала.

К другим специфическим свойствам свинцового теплоносителя относятся [1, 2]:

- низкое давление насыщенного пара $1,44 \cdot 10^{-17}$ Па при $t = 127^\circ\text{C}$ и $5,38 \cdot 10^{-15}$ Па при $t = 527^\circ\text{C}$;
- высокая температура кипения $t_{кип} = 1750^\circ\text{C}$ при атмосферном давлении, в условиях реакторного контура – больше;
- существенно большая плотность $\rho = 10,5 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ при $t = 450^\circ\text{C}$, определяющая силы инерции в потоке;
- большее, чем у воды, поверхностное натяжение: $\sigma = 400\text{н} / \text{м}$ при $t = 350^\circ\text{C}$, определяющее поверхностные свойства теплоносителя;

- несмачиваемость поверхности сталей, имеющих защитные оксидные покрытия в условиях реакторных контуров, краевой угол смачивания оксидированных сталей (в среде сухого аргона) составляет $\theta = 110 - 120^\circ\text{C}$;
- кинематическая вязкость $\nu = 20,99 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с}$ при $t = 400^\circ\text{C}$;
- теплопроводность $\lambda = 16,58 \text{ Вт / мК}$ при $t = 400^\circ\text{C}$, большая, чем у воды, но меньшая, чем у натрия.

Все это существенно изменяет характеристики процессов, происходящих при перекачке ТЖМТ. Безусловно, фундаментальные физические законы распространяются на процессы, происходящие в проточной части насосов, перекачивающих как воду, так и свинцовый и свинец-висмутовый теплоносители. Однако используемые в расчетных методиках насосов эмпирические и полуэмпирические зависимости, полученные при испытаниях на воде, делают неприменимыми эти методики для расчетов и оптимального проектирования насосов, перекачивающих ТЖМТ [3,4]. Это подтверждено опытом создания ГЦН отечественных транспортных реакторных установок со свинец-висмутовым теплоносителем и ГЦН стационарных установок со свинцовым теплоносителем.

Актуальность

В 2010 году правительство РФ приняло ФЦП "Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 годов и на перспективу до 2020 года". Ее цель – разработать новую технологическую платформу. Основной упор в этой программе сделан на реакторах четвертого поколения (предполагает создание реакторов с замкнутым ЯТЦ, в мире до сих пор нет подобног).

Для этой цели в России планируется создание реакторных установок типа БРЕСТ (со свинцовым теплоносителем) и типа СВБР (со свинец-висмутовым теплоносителем). В этих реакторах предполагается использовать ГЦН осевого типа. Принцип действия таких насосов основан на использовании в проточной части диффузорных течений, в отличие от центробежных насосов. Диффузорный поток устойчив лишь при соблюдении определенных условий, нарушение которых ведет к отрыву пограничного слоя от обтекаемых поверхностей и полному переформированию потока. Это приводит к ухудшению характеристик лопастных систем (подачи и напора), а также к эрозии поверхностей проточной части насосов.

Испытания моделей ГЦН реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 на стенде ФТ-4 в НГТУ показали существенное различие фактических подачи и напора насоса и ожидаемых расчетных значений при проектировании насоса по традиционным методикам. Все испытанные (спроектированные по традиционным методикам) рабочие колеса насоса НСО-01 НГТУ имели больший или меньший эрозионный износ при временной базе испытаний 150-300 ч [5, 6].

Для обоснования оптимального проектирования проточной части осевого насоса, перекачивающего высокотемпературный свинцовый теплоноситель в НГТУ была разработана программа НИР, результаты отдельных этапов которой представлены в настоящей статье.

Цель работы

Целью этой работы было проведение экспериментальных и расчетно-теоретических исследований, направленных:

- на исследование зависимости характеристик лопастной системы от угла установки лопаток в свинцовом высокотемпературном теплоносителе.
- определение условий возникновения и характеристик кавитации в ТЖМТ контуров с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемых свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями.
- исследование характеристик эрозионного износа поверхностей лопастной системы осевых насосов после испытаний в высокотемпературном свинцовом теплоносителе.

Предполагается, что проведенные экспериментальные исследования помогут сфор-

мулировать рекомендации по определению оптимальной геометрии и конструкции насосов, перекачивающих высокотемпературный ТЖМТ.

Существующие методики непригодны для расчетов насосов с ТЖМТ. В НГТУ проводятся экспериментальные и расчетно-теоретические исследования, направленные на создание такой методики для ТЖМТ.

Для этой цели были проведены:

- исследования кавитационных процессов в ТЖМТ, определены условия возникновения кавитации и ее характеристики;
- исследования влияния угла установки лопаток на характеристики рабочего колеса осевого насоса;
- исследования характеристик центробежных насосов.

Условия проведения экспериментов:

среда – свинец, эвтектика свинец-висмут;

- температура – 400-500 °С, кратковременно – 550 °С;
- тип насосов – центробежные, осевые;
- подача ТЖМТ – 8-200 м³/ч (80-2000 т/ч);
- термодинамическая активность кислорода в ТЖМТ – 10⁻⁵-100;
- давление над свободным уровнем ТЖМТ ~ 0,0 кгс/см² – 5 кгс/см² (ата);
- расход - переменный с регулируемой скоростью вращения вала электропривода за счет частотного регулирования.

Проведенные исследования направлены на обоснование геометрических характеристик проточных частей лопастных насосов в ТЖМТ.

Описание экспериментального стенда

Принципиальная схема и компоновка контура

В состав контура свинцового теплоносителя входят следующие основные элементы:

- электронасос стенда с установленной в нем моделью проточной части ГЦН;
- задвижка регулирования расхода теплоносителя в контуре;
- парогенератор (теплообменный модуль);
- трубопроводы Ду 200 мм основного циркуляционного контура;
- сильфонный компенсатор Ду 200 осевого типа;
- бачки отжимные для замера давления на входе в электронасос и в его напорной камере;
- плавбак (бак дренажный);
- фильтр механический;
- трубопроводы и арматура систем очистки, заполнения и дренажа свинцового теплоносителя;
- подсистема контроля и регулирования содержания кислорода в свинцовом теплоносителе и очистки контура и теплоносителя от нерастворенных оксидов свинца;
- контрольно-измерительные приборы, входящие в систему сбора обработки и предоставления информации.

Газовый объем полостей электронасоса стенда, парогенератора и дренажного бака, расположенный выше свободных уровней теплоносителей, является совместным для контура свинцового теплоносителя и газовой системы.

Оборудование и трубопроводы контура свинцового теплоносителя выполнены в основном из аустенитной стали типа 08X1Н10Т, имеют секции обогрева с термopарами, а также теплоизоляцию с защитным кожухом из фольги.

Контур циркуляции свинцового теплоносителя выполнен из труб Ø219x3,0 мм и включает последовательные соединения: электронасос, участок трубопровода Ду200, задвижку регулирования расхода теплоносителя клиновую, участок трубопровода Ду200,

сильфон, участок трубопровода Ду200, парогенератор с трубками Фильда, участок трубопровода Ду200, электронасос. Трубопроводы системы заполнения основного циркуляционного контура свинцовым теплоносителем из плавбака через фильтр и дренирования свинца из днищ корпусов насоса и парогенератора выполнены из трубопроводов и арматуры Ду30.

Электронасос НСО-01

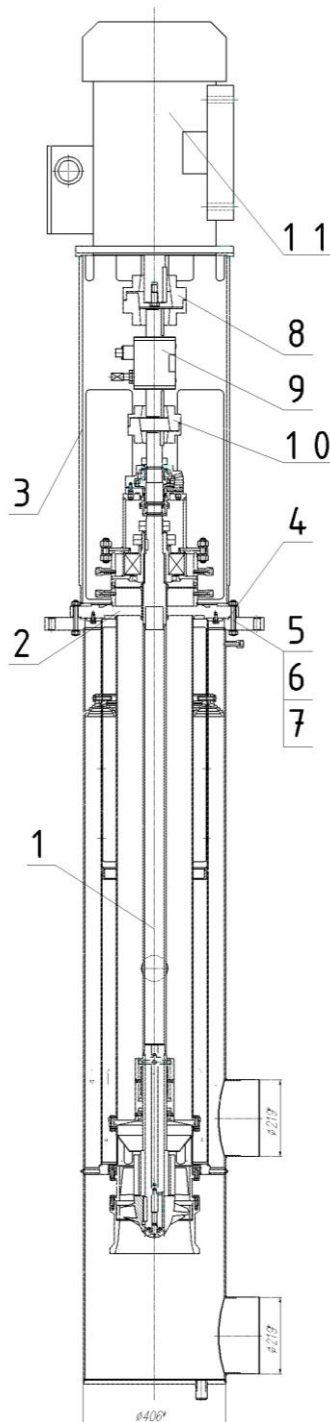


Рис. 1. Электронасос НСО-01:

- 1 – бак насоса; 2 – выемная часть; 3 – стакан;
4 – прокладка; 5 – гайка; 6 – шайба; 7 – шпилька;
8 – муфта HRC-150; 9 – датчик крутящего момента;
10 – муфта HRC-180;
11 – электродвигатель

Электронасос стенда предназначен для проведения испытаний и отработки проточной части модели ГЦН РУ БРЕСТ-ОД-300, обеспечения циркуляции по основному циркуляционному контуру стенда, а также для проверки конструктивных решений и отработки гидростатического подшипника, входящего в состав электронасоса.

Основные характеристики электронасоса в составе стенда:

1. Перекачиваемая среда – расплав свинца с эксплуатационным содержанием примесей РУ БРЕСТ-ОД-300 с возможностью увеличения содержания кислорода до образования в контуре оксидов свинца и с возможностью глубокого (до т/а O_2 в Pb до 10^{-5}) раскисления теплоносителя.

2. Подача свинцового теплоносителя – до 1500 – 2000 т/ч.

3. Перепад, создаваемый насосом до ок. 2,5 м.ст.свинца.

4. Положение верхнего обреза трубы постоянного напора переменное – 1200–1500 мм от оси рабочего колеса

5. Температура перекачиваемого свинца – до 500°C, кратковременно – до 550°C.

6. Число оборотов вала электронасоса номинальное – ок. 1500 об/мин.

7. Регулирование числа оборотов асинхронных электродвигателей приводов насоса – частотное с использованием преобразователей частоты.

8. Электропривод – асинхронные электродвигатели (с номинальным числом оборотов ок. 1500 об/мин) в комплекте с преобразователями частоты.

9. Мощность электродвигателя электронасоса – 50 кВт.

10. Уплотнение вращающегося вала насоса по газу – торцевое.

11. Среда в газовой полости электронасоса – аргон, водород, аргонно-водородные, аргонно-кислородные смеси.

12. Охлаждение подшипников качения и вала электронасоса – водяное.

13. Система обогрева корпуса электронасоса электрическая, секциями из нихромовых электроспиралей.

Описание конструкции электронасоса НСО-01 (рис. 1).

В состав электронасоса входят следующие основные элементы:

- электродвигатель;
- муфта передачи крутящего момента;
- датчик крутящего момента;
- узел с подшипниками качения;
- торцевое уплотнение по газу вращающегося вала;
- кронштейн;
- корпус;
- труба постоянного напора;
- вал электронасоса;
- устройство поворота потока (отвода) на входе в трубу постоянного напора;
- подшипник гидростатический;
- спрямляющий аппарат;
- колесо рабочее осевого типа;
- патрубки подвода и отвода свинцового теплоносителя.

В состав электронасоса входят средства контроля давления в потоке свинца (трубка Пито-Прандтля), положения уровня свинца (электроконтактные датчики), датчики температуры (термопары). Конструкция электронасоса и размещение его в помещении обеспечивают возможность демонтажа и монтажа выемной части из корпуса насоса. Конструкция обеспечивает изменение (уменьшение) высоты трубы постоянного напора. Номинальное положение верхнего обреза трубы постоянного напора – 1500 мм от проточной части насоса, минимальная высота – 1200 мм.

Результаты испытаний

Характеристики лопастных систем осевого насоса в зависимости от угла установки лопаток при четырех- и шестилопастных рабочих колесах

Целью этих работ являлось исследование характеристик лопастных систем с плоскими лопатками в свинцовом теплоносителе в зависимости от угла установки плоских лопаток на рабочем колесе насоса.

Эксперименты проводились с последовательно устанавливаемыми на валу осевого насоса НСО-01 НГТУ рабочими колесами с четырьмя и шестью плоскими лопатками с углами установки плоских лопастей 9° , 15° , 22° , 28° , 35° , 41° , 46° при температуре свинцового теплоносителя $400-450^\circ\text{C}$ со скоростями вращения вала насоса 600, 700, 800, 900, 1000, 1100 об/мин с осевым рабочим колесом $\varnothing 200$ мм при трех гидравлических характеристиках трассы циркуляции, изменяемых положением клина задвижки на напоре насоса. Термодинамическая активность кислорода в свинцовом теплоносителе поддерживалась в диапазоне $10^{-5}-10^{-2}$, что обеспечивало формирование и поддержание оксидных защитных покрытий на поверхностях конструкционных материалов проточной части. Сменные лопастные системы устанавливались последовательно на выемной части осевого насоса НСО-01 НГТУ в контуре свинцового теплоносителя установки испытания моделей проточной части главного циркуляционного насоса реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 (стенда ФТ-4 в НГТУ).

Сравнительный анализ напорно-расходных характеристик при четырех плоских лопатках, установленных под углами 15° , 22° и 35° (рис. 2) показывает существенное различие характеристик лопастной системы от угла установки плоских лопастей. При четырех лопатках максимальная подача насоса $172 \text{ м}^3/\text{ч}$ соответствовала напору 0,8 м ст.Рв при 1100 об/мин, при угле установки 22° . Эти характеристики близки к характеристикам лопастных систем с профилированными лопатками конструкций НГТУ и ЦКБМ. При углах установки 15° и 35° макси-

мальная подача составляла 125 и 143 м³/ч при напоре 0,58 м ст.Рв и 0,6 м ст.Рв при тех же прочих условиях.

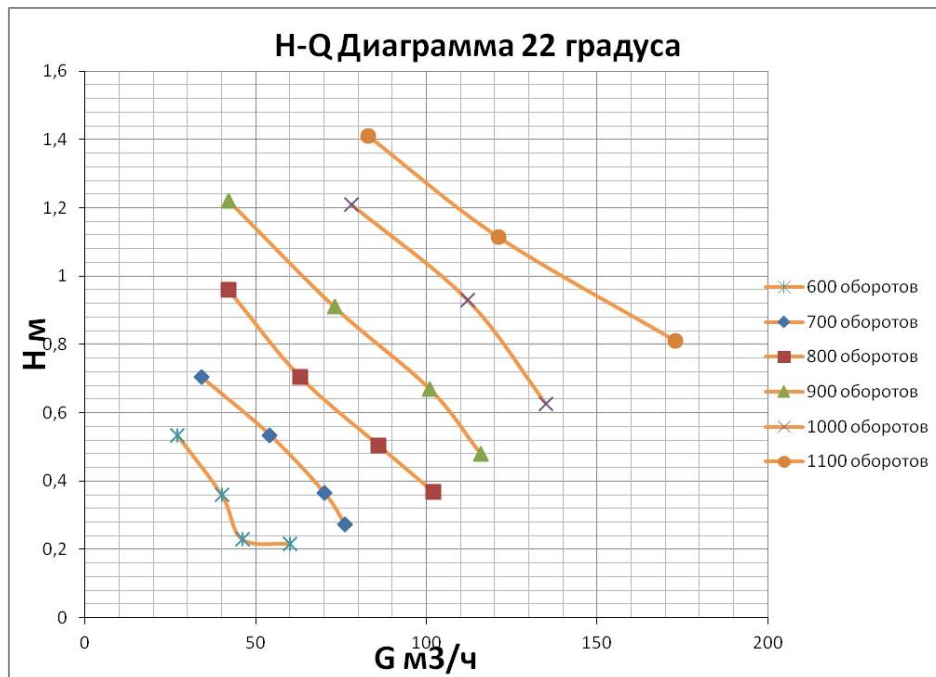


Рис. 2. Напорно-расходная характеристика для четырехлопастной системы

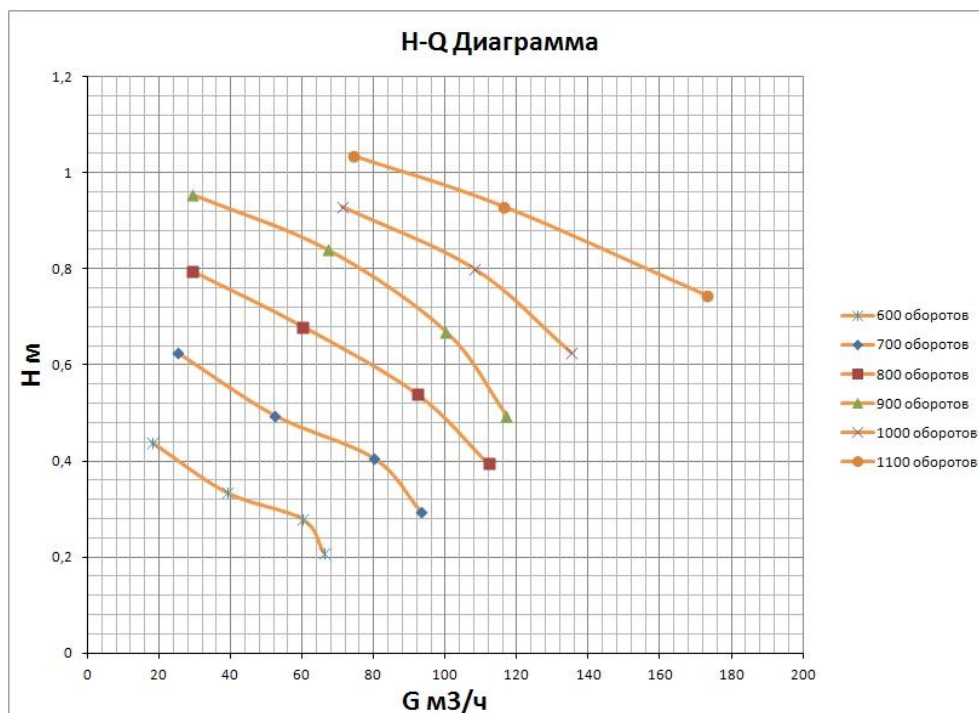


Рис. 3. Напорно-расходная характеристика для шестилопастной системы

Сравнительный анализ напорно-расходных характеристик при шести плоских лопатках, установленных под углами 22, 28 и 35° (рис. 3), показывают существенное различие характеристик лопастей системы при различном числе лопаток на рабочем колесе в аналогичных условиях. Подача насоса при угле установки лопастей 28° составляет ок. 175 м³/ч, напор – 0,75 м ст.Рв при 1100 об/мин. При углах установки 22 и 35° максимальная подача

составляла $113 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $143 \text{ м}^3/\text{ч}$ при напоре $0,36 \text{ м ст.Рв}$ и $0,72 \text{ м ст.Рв}$ при тех же прочих условиях.

Сравнение характеристик насоса с четырьмя и шестью плоскими лопатками (рис. 4) показывает, что при прочих равных условиях подачи лопастных систем с четырьмя и шестью лопатками близки друг к другу, а напоры существенно различаются и зависят от угла установки лопаток.

Ход кривых зависимостей подачи и напора колес с плоскими четырьмя и шестью лопатками аналогичны, однако максимумы подачи при четырех лопатках при 1100 об/мин находятся в диапазоне углов установки лопаток $20\text{-}30^\circ$, а при шести лопатках эти максимумы сдвинуты вправо на $5\text{-}10^\circ$.

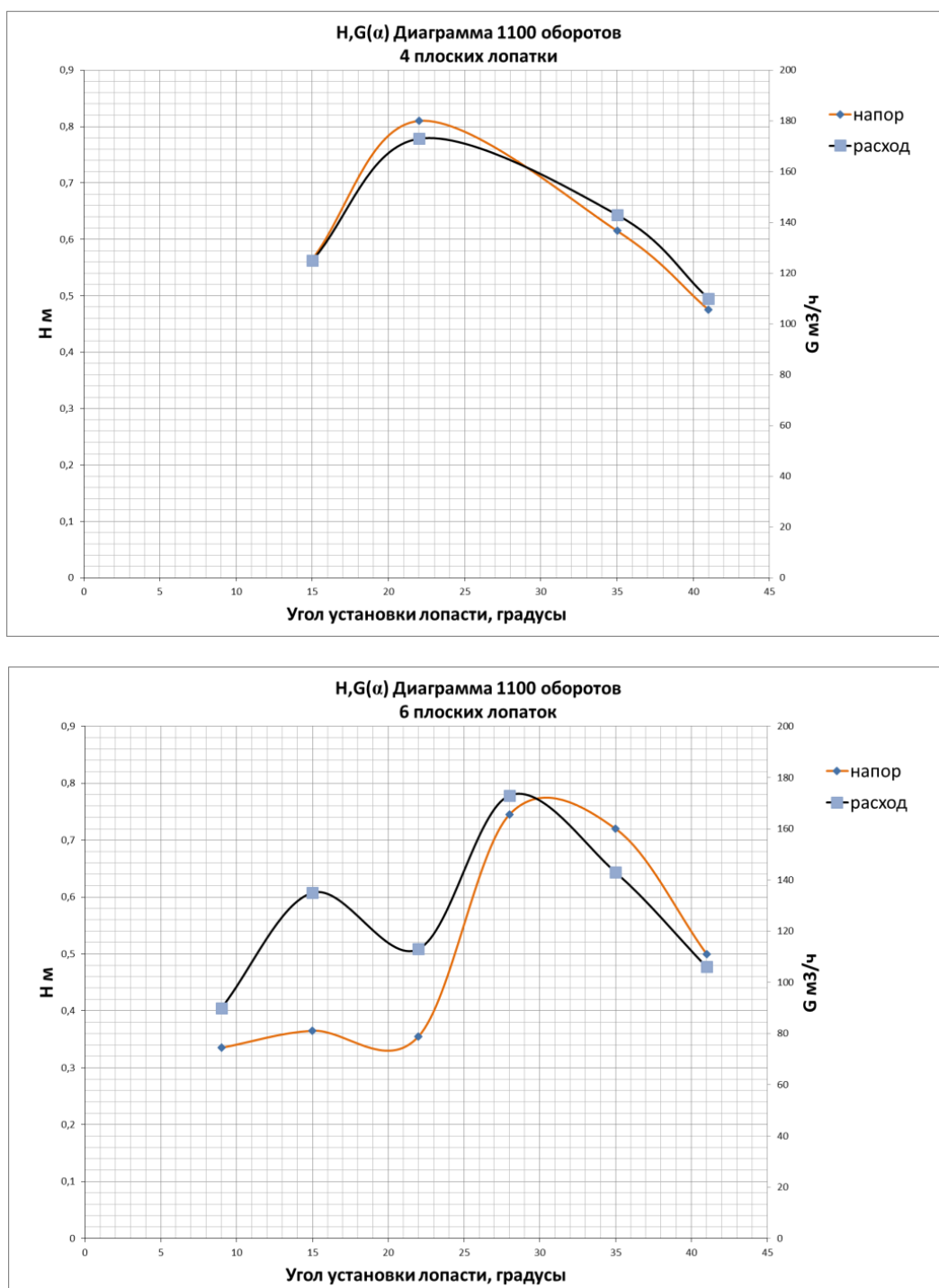


Рис. 4. Зависимость напора и расхода от угла установки плоских лопаток

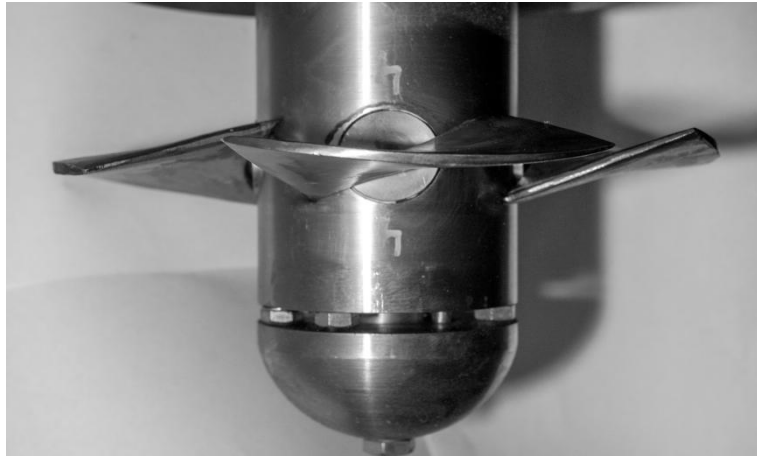


Рис. 5. Фото узла установки четырех лопаток на выемной части НСО-01 НГТУ с поворотными лопатками

При увеличении скорости вращения вала как с четырьмя, так и с шестью лопатками от 600 до ок. 1000 об/мин при прочих равных условиях подача и напор монотонно увеличиваются. При увеличении скорости вращения вала от 1000 до 1100 об/мин фиксируется существенно более резкое возрастание как подачи, так и напора лопастной системы.

В НГТУ была создана конструкция выемной части осевого насоса НСО-01 НГТУ с поворотными лопатками (рис. 5). Проверка полученных ранее данных в условиях высокотемпературного свинцового теплоносителя с использованием этого устройства по характеристикам лопастных систем подтвердила достоверность полученных ранее результатов.

Исследование кавитационных характеристик свинцового и свинец-висмутового теплоносителей

Кавитационные характеристики ТЖМТ существенно отличаются от таковых у других теплоносителей ядерных реакторов. Характеристики взаимодействия (сцепления) свинцового теплоносителя с поверхностью оксидированной стали (работы адгезии) существенно меньше характеристики взаимодействия (сцепления) внутри объема теплоносителя (работы когезии). Поэтому в потоке ТЖМТ при локальном уменьшении по каким-либо причинам давления со стороны поверхности потока на стенку канала поверхность потока за счет сил поверхностного натяжения, гравитации или т.д. отходит от стенки канала, образуя вихри, контактирующие со стенкой через газовую прослойку.

Между стенкой канала и поверхностью потока может образовываться газовая (парогазовая) полость. В процессе движения потока при повышении в нем локального давления, его завихренная поверхность вновь прижимается к стенке. В том случае, если нормальная составляющая скорости ТЖМТ в этом процессе достаточно велика, то возможна эрозия локального участка поверхности с характеристиками, похожими на разрушение при традиционной кавитации [7, 8, 9].

Одной из целей данного комплекса работ являлось исследование условий возникновения кавитации (двухкомпонентного потока: ТЖМТ-газ (парогазовая смесь)), характеристик кавитации и ее типа.

Эксперименты проводились на четырех стендах со свинцовым теплоносителем. На двух из них исследовались процессы кавитации в центробежных насосах, на двух других – в осевых насосах. На одном из стендов с центробежным насосом (ФТ-3 НГТУ) исследовались так же кавитационные характеристики потока свинца в сопле Вентури. Температура свинцового теплоносителя в процессе экспериментов составляла 440-550°C, подача насосов объемная от 6 до 200 м³/ч, что соответствовало массовой подаче 60-2000 т/ч. Скорость вращения вала центробежных насосов – до 2400 об/мин, осевых насосов – до 1400 об/мин, максималь-

ное значение переносной скорости потока в осевых насосах – до 14 м/с. Термодинамическая активность кислорода в теплоносителе составляла 10^{-5} - 10^0 , в последнем случае – при наличии твердой фазы оксидов свинца.

Такой диапазон содержания кислорода обеспечивал формирование и поддержание защитных оксидных покрытий на поверхностях проточной части насосов и их несмачиваемость теплоносителем в процессе испытаний.

В результате исследований установлено, что критическое давление в потоке, при котором начинается кавитация, составляет 0,3-0,6 кгс/см² (ата). В процессе развития кавитации, при уменьшении давления в потоке ТЖМТ вплоть до ок. 0,0 кгс/см² (ата) массовая подача и напор насоса монотонно уменьшаются, традиционный кавитационный «срыв» насоса не происходит. Аналогичные результаты получены при испытании центробежных и осевых насосов и в сопловом устройстве.

Как видно из графика рис. 6, в процессе уменьшения давления на входе в рабочее колесо центробежного насоса на стенде ФТ-3 НГТУ при $n = 1000$ и 1100 об/мин нагрузка электродвигателя оставалась примерно постоянно до давления на входе в рабочее колесо ок. 0,6 кгс/см² (ата). При последующем уменьшении давления нагрузка электродвигателя плавно уменьшается до величины, существенно превышающей нагрузку «холодного хода», определенную экспериментально. Уменьшение полезной нагрузки насоса примерно в два раза коррелирует с уменьшением до 0,7-0,8 от исходной как массовой подачи, так и напора насоса [7].

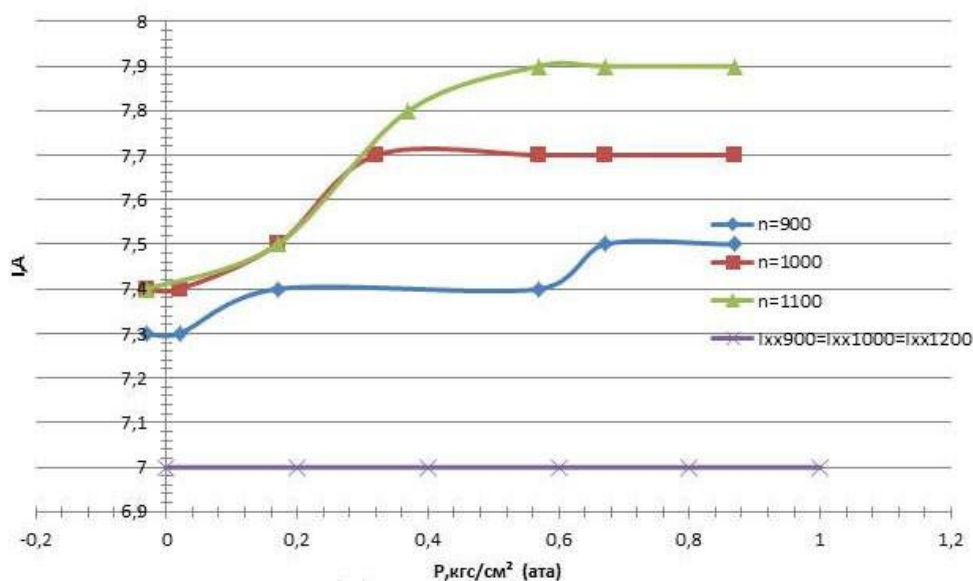


Рис. 6. Зависимость нагрузки на электродвигателе от давления на входе в рабочее колесо центробежного насоса НЦС-04 НГТУ на стенде ФТ-3 НГТУ

Характер кавитации в условиях реакторных контуров со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителем соответствует так называемой газовой кавитации, а не традиционной паровой. Экспериментами в НГТУ подтверждено наличие газа в объеме отстоявшегося ТЖМТ, отобранного из длительно эксплуатировавшегося циркуляционного контура.

Исследование эрозионного износа лопастных систем насосов в свинцовом теплоносителе

Многочисленными экспериментами доказано [1, 2], что работоспособность сталей в свинцовом и свинец-висмутовом теплоносителе при температурах 400-450°С может быть обеспечена только при наличии защитных покрытий на поверхностях элементов конструкций, контактирующих с ТЖМТ. Общепринятым и рекомендованным методом защиты сталей

в реакторных установках с ТЖМТ (БРЕСТ, СВБР) является использование защитных оксидных покрытий, формируемых в процессе изготовления конструкций или формируемых и доформируемых непосредственно в составе реакторного контура в результате контакта с теплоносителем, имеющим необходимый окислительный потенциал. Применительно к условиям лопастных систем насосов, эксплуатировавшихся в свинец-висмутовом теплоносителе, использовались покрытия из бериллия. Прорабатываются варианты защиты рабочих колес ГЦН РУ со свинцовым теплоносителем нанесением на них различных покрытий до установки их в реакторный контур. Основным недостаток этих покрытий – объективная возможность их разрушения в процессе эксплуатации в результате термокачек и термоударов, механического износа и др. При невозможности доформирования таких покрытий в местах их разрушения в процессе эксплуатации возникают «слабые места» в конструкции, что делает такие покрытия неконкурентными по сравнению с традиционными оксидными покрытиями.

Примером воздействия потока ТЖМТ на элементы конструкций лопастной системы насоса может служить разрушение рабочего колеса (ПЧ №3 НГТУ) на стенде ФТ-4 в НГТУ. В результате аварийного разрушения узла крепления приемного патрубка с внешним каналом (обечайкой) рабочего колеса насоса НСО-01 НГТУ произошло заклинивание рабочего колеса в этой обечайке с отклонением ее оси от оси вращения вала насоса на 3-5°. В течение ок. 30 ч рабочее колесо совместно с обечайкой вращались в деформированном потоке ТЖМТ в проточной части несоосно с осью вращения вала насоса. В результате этого участок рабочего колеса с внешней стороны относительно оси вращения вала насоса был существенно разрушен (рис. 6), тогда как участок рабочего колеса с внутренней стороны следов эрозионных повреждений не имел.

При испытаниях рабочих колес с оксидными и другими покрытиями в свинцовом теплоносителе при 440-500°C фиксировались разрушения выходных кромок лопаток, поверхностей лопаток (как правило, всасывающих), поверхностей ступицы.

Безусловно, очевидным способом предотвращения эрозионных разрушений элементов лопастных систем насоса, работающих в ТЖМТ, является создание такой геометрии проточной части, которая исключала бы отрыв потока и образование вихрей в межлопастном пространстве с интенсивностью, приводящей к разрушению поверхностей лопастной системы.

Заключение

1. Особенности физических характеристик высокотемпературных свинцового и свинец-висмутового теплоносителей установок с реакторами на быстрых нейтронах делают непригодным использование традиционных методов расчета и оптимального проектирования ГЦН этих установок.

2. Проведенные экспериментальные исследования проточных частей насоса осевого типа с различным количеством плоских лопастей и с различными углами установки лопастей позволили провести комплексный анализ результатов исследований и сделать следующие выводы:

- угол установки лопасти очень сильно влияет на рабочие характеристики насоса, перекачивающего ТЖМТ;
- оптимальный угол установки лопастей, как показали исследования, лежит в диапазоне 20-30° - для четырехлопастной системы и 25-35° - для шестилопастной;
- большие или меньшие значения углов атаки рабочих лопастей осевого насоса приводят к ухудшению параметров насоса.

3. Проведенные в НГТУ исследования позволили определить кавитационные характеристики свинцового и свинец-висмутового теплоносителей применительно к условиям реакторов на быстрых нейтронах с этими теплоносителями, необходимые для обоснованного проектирования ГЦН реакторных контуров. Установлено, что контурам с ТЖМТ присуща так называемая газовая кавитация, а не традиционная паровая. Критическое давление в потоке, при котором начинается кавитация, составляет 0,3-0,6 кгс/см² (ата).

4. Основными уязвимыми местами для эрозионного износа являются выходные кромки лопаток и их всасывающие поверхности. Для борьбы с эрозионным износом используются оксидные покрытия, формирующиеся в потоке теплоносителя. Однако для минимизации разрушений необходимо создание геометрически оптимальных проточных частей, исключая отрыв потока от стенок и образование вихрей.

5. В результате выполнения комплексной программы экспериментальных и расчетно-теоретических исследований предполагается разработка обоснованных методик расчета и оптимального проектирования лопастных насосов, перекачивающих ТЖМТ.

Библиографический список

1. **Безносков, А.В.** Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М.: ИздАТ, 2006. – 370 с.
2. **Безносков, А.В.** Технологии и основное оборудование контуров реакторных установок, промышленных и исследовательских стендов со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, П.А. Боков. – Н.Новгород: Литера, 2016. – 488 с.
3. **Безносков, А.В.** Специфика циркуляционных насосов реакторных контуров со свинцовым и свинецвисмутовым теплоносителями / А.В. Безносков [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 4. – С. 155–160.
4. **Безносков, А.В.** Особенности гидродинамики свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей / А.В. Безносков [и др.] // Атомная энергия. – 2010. – Т. 109. – № 2. – С. 72–76.
5. **Безносков, А.В.** Экспериментальное исследование проточной части модели осевого главного циркуляционного насоса реакторной установки с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем / А.В. Безносков [и др.] // Вестник машиностроения. – 2014. – № 2. – С. 53–56.
6. **Безносков, А.В.** Исследование характеристик проточной части и подшипникового узла реакторной установки со свинцовым теплоносителем / А.В. Безносков [и др.] // Трение и износ. – 2014. – Т. 35. – № 4. – С. 489–493.
7. **Боков, П. А.** Исследование условий возникновения и характеристик кавитации в главных циркуляционных насосах реакторов на быстрых нейтронах, охлаждаемых ТЖМТ: дисс. ... канд. техн. наук, 2015. – 177 с.
8. **Безносков, А.В.** Экспериментальное исследование условий возникновения и характеристик газовой кавитации в потоке свинцового теплоносителя инновационных ядерных реакторов на быстрых нейтронах / А.В. Безносков [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – № 2. – С. 85–94.
9. **Карелин, В.Я.** Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах / В.Я. Карелин. – М.: Машиностроение, 1975. – С. 5–20, с. 57–79.

*Дата поступления
в редакцию 26.01.2017*

A.V. Beznosov, T. A. Bokova, A. D. Zudin, A. A. Kozlov, A. G. Belousov, O. O. Novozhilova

EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND TESTING OF PUMPS FOR PUMPING LEAD AND LEAD-BISMUTH COOLANT FOR NUCLEAR PLANTS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev

Purpose: In NSTU carried out experimental and theoretical research aimed at the creation of methods of calculation axial flow pumps for HTML presented in this article.

Design/methodology/approach: In order to create an empirically grounded methodologies of design and analysis of flow parts of pumps for pumping heavy liquid metal coolants in Nizhny Novgorod state technical University was conducted the following experimental studies:

- studies of cavitation processes in lead and lead-bismuth coolants, it is determined the conditions of occurrence of cavitation and its characteristics;

- study of the effect of the angle of the vanes on the characteristics of the impeller of an axial pump;
- study the characteristics of centrifugal pumps.

Findings : In the result of implementation of the comprehensive program of experimental and theoretical studies it is intended to develop reasonable methods of calculation and optimal design of centrifugal pumps, pumping molten lead and lead-bismuth.

Research limitations/implications

- a. Features the physical characteristics of heavy liquid metal coolants make the use of traditional methods of calculation and optimal design of the main circulation pumps of these units.
- b. As a result of researches it is established that circuits with heavy liquid metal coolants characterized by the so-called gas cavitation, rather than the traditional steam. The critical pressure in the flow at which cavitation starts, is 0,3-0,6 (ATA).

Originality/value: Held at NSTU research focuses on experimental study of geometric characteristics of the flow parts of centrifugal pumps, pumping lead and lead-bismuth coolant with reference to reactor installations of the type BREST.

Key words: heavy liquid metal coolants, nasoloda, angle, justification, calculation methods.