

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОТРАБОТКА ХАРАКТЕРИСТИК НАСОСОВ НА СВИНЦОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

А.В. Безносков, А.В. Львов, П.А. Боков, Т.А. Бокова, Д.В. Шихов

НГТУ им Р.Е. Алексеева

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24



Главные циркуляционные насосы в контурах реакторов на быстрых нейтронах работают в специфических условиях физических параметров тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) – свинцового и свинцово-висмутового, термодинамические характеристики которых качественно отличаются от аналогичных характеристик традиционных теплоносителей – воды и натрия. Кавитационные характеристики ТЖМТ также существенно отличаются от характеристик других теплоносителей ядерных реакторов.

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.

Испытания моделей ГЦН реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 на стенде ФТ-4 в НГТУ показали, что при рабочих условиях проведения экспериментов, свойственных РУ с ТЖМТ, фиксируется существенное различие фактических подачи и напора насоса и ожидаемых расчетных значений при проектировании насоса по традиционным методикам. Для обоснования оптимального проектирования проточной части осевого насоса, перекачивающего высокотемпературный свинцовый теплоноситель, в НГТУ разработана программа НИР, результаты отдельных этапов которой представлены в статье.

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель, реакторная установка на быстрых нейтронах, ГЦН, колесо насоса, кавитация, напор насоса, центробежная и осевая конструкции лопастных систем.

ВВЕДЕНИЕ

Ресурсная работоспособность контура ядерного реактора существенно зависит от характеристик главного циркуляционного насоса (ГЦН) контура. ГЦН в контурах реакторов на быстрых нейтронах работают в специфических условиях физических параметров свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей, термодинамические характеристики которых качественно отличаются от аналогичных характеристик традиционных теплоносителей – воды и натрия.

К специфическим свойствам свинцового теплоносителя относятся [1]

– 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 $t_{\text{кип}} = 1750^\circ\text{C}$ при атмосферном давлении, в ус-

© А.В. Безносков, А.В. Львов, П.А. Боков, Т.А. Бокова, Д.В. Шихов, 2015

ловиях реакторного контура – выше;

- большая плотность $\rho = 10,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ при $t = 450^\circ\text{C}$, определяющая силы инерции в потоке;

- большее, чем у воды, поверхностное натяжение $\sigma = 400 \text{ н/м}$ 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 $\nu = 20,99 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ 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.

Кавитационные характеристики ТЖМТ существенно отличаются от кавитационных характеристик других теплоносителей ядерных реакторов. Характеристики взаимодействия (сцепления) свинцового теплоносителя с поверхностью оксидированной стали (работы адгезии) существенно меньше характеристик взаимодействия (сцепления) внутри объема теплоносителя (работы когезии). Поэтому в потоке ТЖМТ при локальном уменьшении давления со стороны поверхности потока на стенку канала поверхность потока за счет сил поверхностного натяжения, гравитации и т.п. 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, возможна эрозия локального участка поверхности с характеристиками, похожими на разрушение при традиционной кавитации [2 – 4].

Безусловно, фундаментальные физические законы распространяются на процессы, происходящие в проточной части насосов, перекачивающих как воду, так и свинцовый и свинцово-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 [5, 6]. Это подтверждено опытом создания главных циркуляционных насосов отечественных транспортных реакторных установок со свинцово-висмутовым теплоносителем и ГЦН стационарных установок со свинцовым теплоносителем.

Испытания моделей ГЦН реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 на стенде ФТ-4 в НГТУ показали, что в диапазоне расходов свинцового теплоносителя $80 - 200 \text{ м}^3/\text{ч}$, температурах от 440 до 550°C и скоростях вращения вала насоса НСО-01 НГТУ $600 - 1200 \text{ об/мин}$ фиксируется 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 имели больший или меньший эрозионный износ при временной базе испытаний $150 - 300$ часов [7, 8].

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

ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Одной из целей комплекса НИР являлось исследование условий возникновения кавитации (двухкомпонентного потока ТЖМТ-газ (парогазовая смесь)), ее ха-

рактических и 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 кавитационные характеристики потока свинца в сопле Вентури. Температура свинцового теплоносителя в процессе экспериментов составляла 440 – 550°C, объемная подача насосов от 6 до 200 м³/ч, что соответствовало массовой подаче 60 – 2000 т/ч. Скорость вращения вала центробежных насосов – до 2400 об/мин, осевых – до 1400 об/мин, максимальное 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 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 примерно до 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.

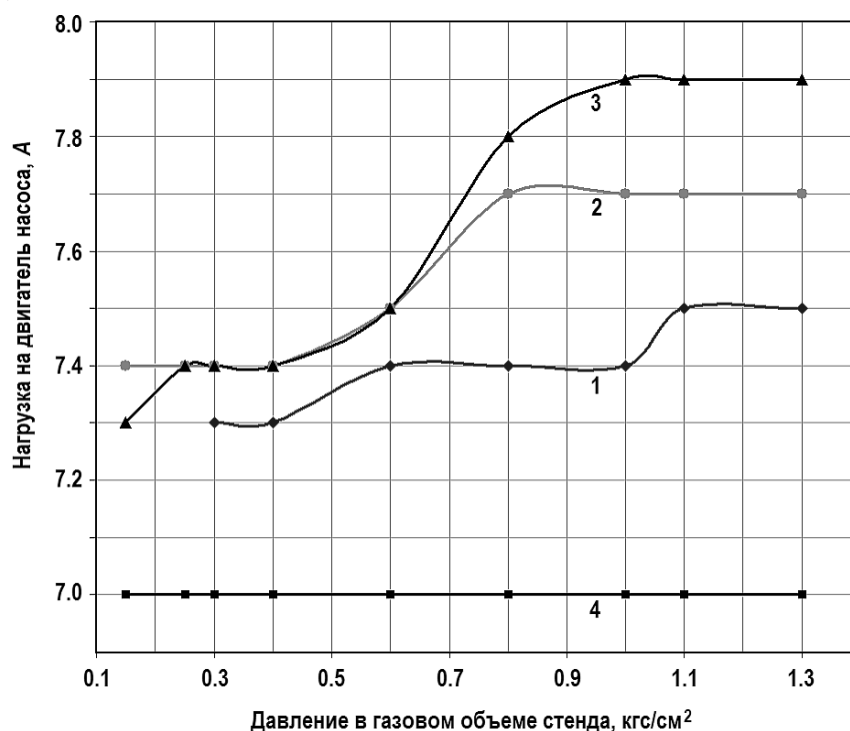


Рис. 1. Зависимость нагрузки на электродвигатель от давления на входе в рабочее колесо центробежного насоса НЦС-04 НГТУ на стенде ФТ-3 НГТУ: 1 – 900 об/мин; 2 – 1000 об/мин; 3 – 1100 об/мин; 4 – $I_{xx900} = I_{xx1000} = I_{xx1100}$

Как видно из графика (рис. 1), в процессе уменьшения давления на входе в рабочее колесо центробежного насоса на стенде при $n = 1000$ и 1100 об/мин нагрузка

электродвигателя оставалась примерно постоянной до давления на входе в рабочее колесо $\sim 0,6 \text{ кгс/см}^2$ (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 [2].

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОПАСТНЫХ СИСТЕМ ОСЕВОГО НАСОСА ОТ УГЛА УСТАНОВКИ ЛОПАТОК ПРИ ЧЕТЫРЕХ- И ШЕСТИЛОПАСТНЫХ РАБОЧИХ КОЛЕСАХ

Целью работы являлось исследование характеристик лопастных систем с плоскими лопатками в свинцовом теплоносителе в зависимости от угла установки 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 (рис. 2) с углами установки плоских лопастей 15, 22, 28, 35, 41, 53° при температуре свинцового теплоносителя 400 – 450°С со скоростями вращения вала насоса 600, 700, 800, 900, 1000, 1100 об/мин с осевым рабочим колесом, диаметром 200 мм, при трех гидравлических характеристиках трассы циркуляции, изменяемых положением клина задвижки на напоре насоса. Термодинамическая активность кислорода в свинцовом теплоносителе поддерживалась в диапазоне $10^{-5} - 10^0$, 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 в контуре свинцового теплоносителя установки испытания моделей проточной части главного циркуляционного насоса реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 (стенда ФТ-4 в НГТУ).

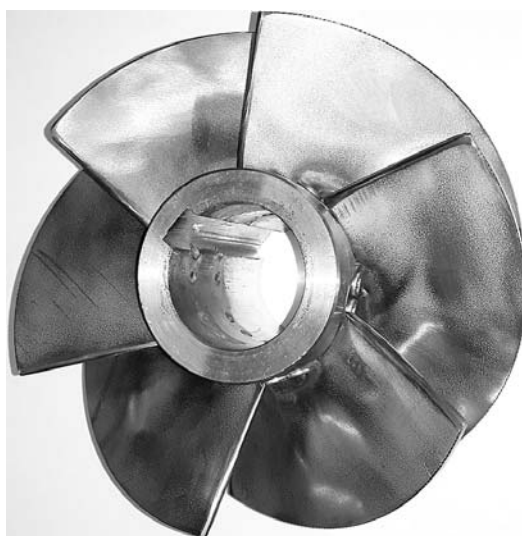


Рис. 2. Рабочее колесо с шестью плоскими лопатками

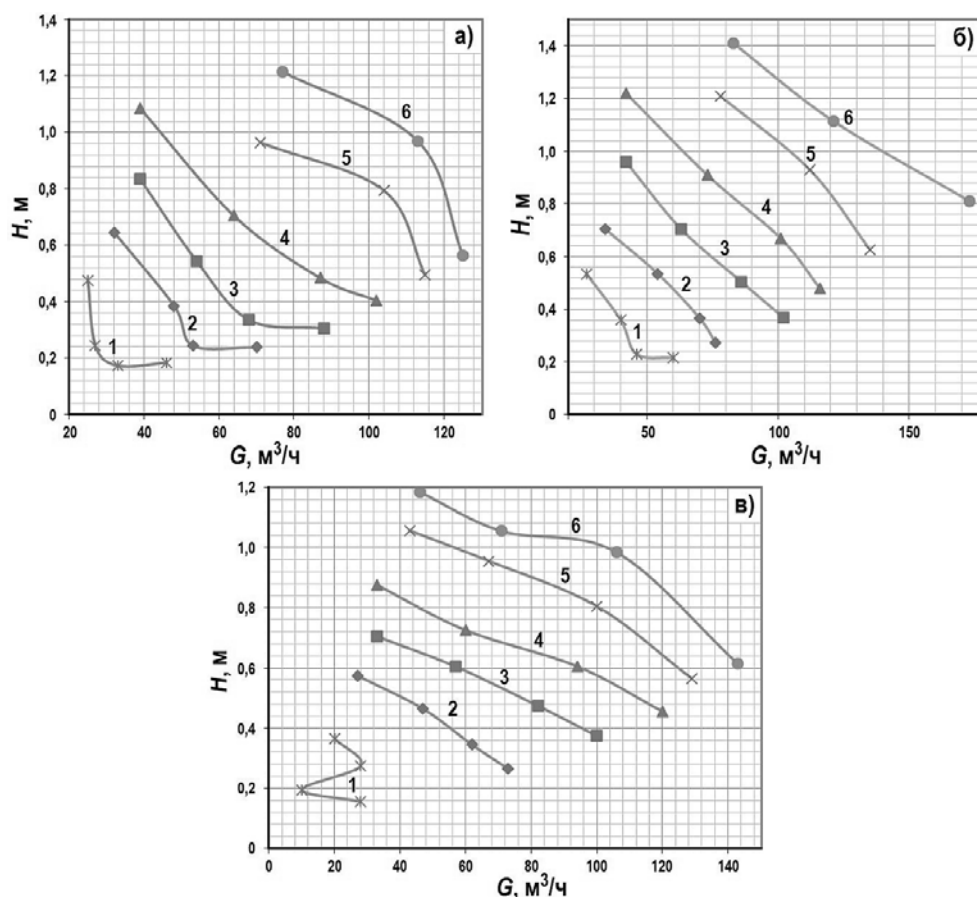


Рис. 3. Напорно-расходные характеристики для четырехлопастной системы при угле установки плоских лопастей: а) – 15°; б) – 22°; в) – 35°. Скорости вращения: 1 – 600 об/мин; 2 – 700 об/мин; 3 – 800 об/мин; 4 – 900 об/мин; 5 – 1000 об/мин; 6 – 1100 об/мин

Сравнительный анализ напорно-расходных характеристик при четырех плоских лопатках, установленных под углами 15, 22 и 35° (рис. 3), показывает существенное различие характеристик лопастной системы от угла установки плоских лопастей. При четырех лопатках максимальная подача насоса 172 м³/ч соответствовала напору 0,8 м ст.Рб 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° максимальная подача составляла 125 и 143 м³/ч при напоре 0,58 и 0,6 м ст.Рб при тех же прочих условиях.

Сравнительный анализ напорно-расходных характеристик при шести плоских лопатках, установленных под углами 15 и 28° (рис. 4), показывает существенную разницу характеристик лопастей системы при различном числе лопаток на рабочем колесе в аналогичных условиях. Подача насоса при угле установки лопастей 28° составляет ~ 175 м³/ч, напор – 1,05 м ст.Рб при 1100 об/мин; при 15° подача составляет 135 м³/ч, напор – 0,36 м ст.Рб при 1100 об/мин.

Сравнение характеристик насоса с четырьмя и шестью плоскими лопатками показывает, что они при равных условиях подачи лопастных систем 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 аналогичен, однако максимумы подачи при четырех лопатках при 1100 об/мин находятся в диапазоне углов установки лопаток 20 – 30°, а при ше-

сти лопатках эти максимумы сдвинуты вправо на 5 – 10°.

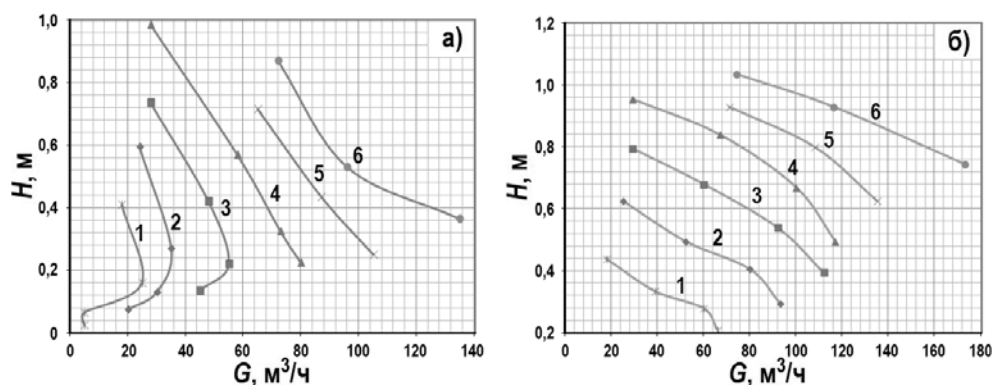


Рис. 4. Напорно-расходная характеристика для шестилопастной системы при угле установки плоских лопастей: а) – 15°; б) – 28°. Скорости вращения: 1 – 600 об/мин; 2 – 700 об/мин; 3 – 800 об/мин; 4 – 900 об/мин; 5 – 1000 об/мин; 6 – 1100 об/мин

При увеличении скорости вращения вала как с четырьмя, так и с шестью лопатками от 600 до ~ 1000 об/мин при 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 с поворотными лопатками (рис. 5). Проверка полученных данных в условиях высоко-температурного свинцового теплоносителя с использованием этого устройства по характеристикам лопастных систем подтвердила достоверность полученных ранее результатов.



Рис. 5. Узел установки поворотных лопаток НСО-01 НГТУ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА ЛОПАСТНЫХ СИСТЕМ НАСОСОВ В СВИНЦОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

Многочисленными экспериментами доказано [1], что работоспособность сталей в свинцовом и свинцово-висмутовом теплоносителях 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. Возможны варианты защиты рабочих колес главных циркуляционных насосов РУ со свинцовым теплоносителем при нанесении на них различных покрытий до установки в реакторный контур. Основным недостатком этих покрытий является объективная возможность их разрушения при 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 результате аварийного разрушения узла крепления приемного патрубка с внешним каналом (обечайкой) рабочего колеса насоса НСО-01 произошло заклинивание колеса в этой обечайке с отклонением ее оси от оси вращения вала насоса на $3 - 5^\circ$. В течение примерно 30-ти часов рабочее колесо вместе 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.



Рис. 6. Участок эрозионного разрушения лопастной системы ПЧ №3 электронасоса НСО-01

При испытаниях рабочих колес с оксидными и другими покрытиями в свинцовом теплоносителе при $440 - 500^\circ\text{C}$ 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 высокотемпературного свинцового теплоносителя установок с реакторами на быстрых нейтронах делают непригодным использование традиционных методов расчета и оптимального проектирования главных циркуляционных насосов этих установок.

2. Проведенные в НГТУ исследования позволили определить необходимые для

обоснованного проектирования главных циркуляционных насосов реакторных контуров кавитационные характеристики свинцового теплоносителя применительно к условиям реакторов на быстрых нейтронах.

3. Экспериментальные исследования центробежных и осевых конструкций лопастных систем насосов для перекачки свинцового и свинцово-висмутowego теплоносителей при температурах от 420 до 500°C, кратковременно 550°C при подачах 80 – 2000 т/ч и напорах 1,5 – 6,0 м ст.ТЖМТ позволили экспериментально обосновать конструкции центробежных и осевых насосов (в части углов установки лопаток и др.).

4. В результате выполнения комплексной программы экспериментальных и расчетно-теоретических исследований предполагается разработка методик расчета и оптимального проектирования лопастных насосов, перекачивающих ТЖМТ. Результаты, отраженные в статье, являются первым этапом этой работы.

Литература

1. Безносков А.В. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М.: ИздАТ, 2006. – 370 с.: ил.
2. Боков П.А. Исследование условий возникновения и характеристик кавитации в главных циркуляционных насосах реакторов на быстрых нейтронах, охлаждаемых ТЖМТ / Дис. на соис. уч. ст. канд. техн. н. 2015 г. – 177 с.
3. Безносков А.В., Боков П.А., Львов А.В., Новожилова О.О., Новинский Э.Г., Лемехов В.В. Экспериментальное исследование условий возникновения и характеристик газовой кавитации в потоке свинцового теплоносителя инновационных ядерных реакторов на быстрых нейтронах // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2012. № 2. С. 85-94.
4. Карелин В.Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. – М.: Машиностроение, Стр. 5-20, 57-79. 1975 г.
5. Безносков А.В., Антоненков М.А., Боков П.А., Баранова В.С., Кустов М.С. Специфика циркуляционных насосов реакторных контуров со свинцовым и свинцово-висмутowym теплоносителями // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2009. № 4. С. 155-160.
6. Безносков А.В., Боков П.А., Антоненков М.А., Баранова В.С., Махов К.А., Бокова Т.А. Особенности гидродинамики свинцового и свинцово-висмутowego теплоносителей // Атомная энергия. 2010. Т. 109. № 2. С. 72-76.
7. Безносков А.В., Дроздов Ю.Н., Антоненков М.А., Бокова Т.А., Львов А.В., Лемехов В.В. Экспериментальное исследование проточной части модели осевого главного циркуляционного насоса реакторной установки с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем // Вестник машиностроения. 2014. № 2. С. 53-56.
8. Безносков А.В., Дроздов Ю.Н., Антоненков М.А., Бокова Т.А., Лемехов В.В., Львов А.В. Исследование характеристик проточной части и подшипникового узла реакторной установки со свинцовым теплоносителем // Трение и износ. 2014. Т. 35. № 4. С. 489-493.

Поступила в редакцию 11.11.2015 г.

Авторы

Безносков Александр Викторович, профессор, доктор техн. наук

E-mail: beznosov@nttu.nnov.ru

Львов Александр Вячеславович, инженер

E-mail: beznosov@nntu.nnov.ru

Боков Павел Андреевич, ассистент

E-mail: beznosov@nntu.nnov.ru

Бокова Татьяна Александровна, доцент,

E-mail: tatabo@bk.ru

Шихов Денис Владимирович, магистрант

E-mail: beznosov@nntu.nnov.ru

UDC 621.039

EXPERIMENTAL RESEARCH AND TESTING OF PUMP CHARACTERISTICS WITH NUCLEAR REACTOR'S LEAD COOLANT

Beznosov A.V., L'vov A.V., Bokov P.A., Bokova T.A., Shikhov D.V.

NSTU n.a. R.E. Alekseev

24 Minin st., Nizhnij Novgorod, 603950 Russia

ABSTRACT

The main circulation pump in the fast neutron reactors operating in specific conditions of the physical parameters of lead and lead-bismuth coolant. Scope last are qualitatively different from those of the thermodynamic characteristics of conventional heat transfer fluids: water and sodium. HLHC cavitation characteristics significantly different from those of other coolants of nuclear reactors.

Used in calculation methods pumps empirical and semiempirical dependences obtained in tests on the water, do not apply these techniques for the calculation and optimal design of pumps, pumping HLHC.

Test models MCP reactor BREST-OD-300 on the stand FT-4 NSTU showed that under the operating conditions of the experiment, inherent to reactor plants with HLHC, recorded a significant difference of actual flow and pressure of the pump and the expected settlement value in the design of the pump in the traditional techniques.

To justify the optimal design of the axial flow pump, pumping fluid into a high-temperature lead NSTU has developed a program of scientific research, the results of the individual steps that are presented in this article.

Key words: heavy liquid metal coolant, heavy liquid metal coolant, reactor installation on fast neutrons, MCP, pump impeller; cavitation pump head; design centrifugal and axial vane-pump system.

REFERENCES

1. Beznosov A.V., Dragunov Yu.G., Rachkov V.I. Tyazhyolye zhidkometallicheskie teplonositeli v atomnoj energetike [The heavy liquid metal coolant in nuclear power]. Moscow. Izdat Publ., 2006. 370 p. (in Russian).
2. Bokov P.A. Issledovanie uslovij vozniknoveniya i harakteristik kavitacii v glavnyh cirkulyacionnyh nasosah reaktorov na bystryh nejtronah, ohlazhdaemyh TZhMT. Dissertaciya na soiskanie uchyonoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk [Investigation of the conditions of occurrence and characteristics of cavitation in the main circulation pumps of fast reactors, cooled heavy liquid metal]. Nizhnij Novgorod, 2015. 177 p. (in Russian).
3. Beznosov A.V., Bokov P.A., Lvov A.V., Novozhilova O.O., Novinskij E.G., Lemehov V.V. Eksperimental'noe issledovanie uslovij vozniknoveniya i harakteristik gazovoj kavitacii v potoke svincovogo teplonositelya innovacionnyh yadernyh reaktorov na bystryh nejtronah. [Experimental study of conditions for the occurrence and characteristics of gas cavitation in the flow of coolant lead innovative nuclear reactors on fast neutrons]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2012, no. 2, pp. 85-94 (in Russian).
4. Karelin V.Ya. Kavitacionnye yavleniya v centrobeznyh i osevyh nasosah [Cavitation in centrifugal and axial pumps]. Moscow. Mashinstroenie Publ., 1975. pp. 5-20, 57-79 (in Russian).
5. Beznosov A.V., Anotonenkov M.A., Bokov P.A., Baranova V.S., Kustov M.C. Specifika cirkulyacionnyh nasosov reaktornyh konturov so svincovym i svinecvismutovym teplonositelyami [The specifics of the reactor coolant pumps and circuits with lead and lead-bismuth coolants]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2009, no. 4, pp. 155-160 (in Russian).

6. Beznosov A.V., Bokov P.A., Antonenkov M.A., Baranova V.S., Mahov K.A., Bokova T.A. Osobennosti gidrodinamiki svincovogo i svincovo-vismutovogo teplonositelej [Features hydrodynamics lead and lead-bismuth coolant]. *Atomnaya energiya*. 2010, vol. 109. no. 2, pp. 72-76 (in Russian).
7. Beznosov A.V., Drozdov Yu.N., Antonenkov M.A., Bokova T.A., L'vov A.V., Lemehov V.V. Eksperimental'noe issledovanie protochnoj chasti modeli oseвого glavnogo cirkulyacionnogo nasosa reaktornoj ustanovki s tyazhelym zhidkometallicheskim teplonositelem [Experimental study of flow part of the models of the main circulation pump of the reactor plant with a heavy liquid metal coolant]. *Vestnik mashinostroenija*. 2014. no. 2, pp. 53-56 (in Russian).
8. Beznosov A.V., Drozdov Yu.N., Antonenkov M.A., Bokova T.A., Lemehov V.V., L'vov A.V. Issledovanie harakteristik protochnoj chasti i podshipnikovogo uzla reaktornoj ustanovki so svincovym teplonositelem [Study of characteristics of flow part and bearing assembly of the reactor installation with a lead coolant]. *Trenie i iznos*. 2014, v. 35, no. 4, pp. 489-493 (in Russian).

Authors

Beznosov Aleksandr Viktorovich, Professor, Dr. Sci.(Engineering)

E-mail: beznosov@nttu.nnov.ru

L'vov Aleksandr Vyacheslavovich, Engineer

E-mail: beznosov@nttu.nnov.ru

Bokov Pavel Andreevich, Assistant

E-mail: beznosov@nttu.nnov.ru

Bokova Tat'yana Aleksandrovna, Assistant Professor

E-mail: tatabo@bk.ru

Shikhov Denis Vladimirovich, Graduate Student

E-mail: beznosov@nttu.nnov.ru