

УДК 621.039

А.В. Безносков, П.А. Боков, А.Д. Зудин, А.В. Львов, Т.А. Бокова, Н.В. Трушков

**ГИДРОДИНАМИКА И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МОДЕЛЕЙ ГЦН БРЕСТ-ОД-300
В СВИНЦОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ НА СТЕНДЕ ФТ-4 НГТУ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предмет, тема, цель работы: В данной статье описаны результаты исследовательских испытаний на стенде ФТ-4А целью которых являлось предварительное определение работоспособности проточной части осевого насоса с подшипниковым узлом.

Метод или методологию проведения работы: В НГТУ им. Р.Е. Алексеева спроектирован и изготовлен стенд ФТ-4 НГТУ, позволяющий проводить комплексные исследования характеристик модельных проточных частей осевого типа различной конструкции, при следующих основных параметрах: теплоноситель – свинец с температурой до 550°C; расход через модель насоса – до 2000 т/ч; напор насоса – до 1,5 м.

Результаты и область их применения: Проведенные исследования подтвердили принципиальную возможность создания осевого насоса, включающего гидростатический подшипник применительно к реакторной установке БРЕСТ-ОД-300 на свинцовом теплоносителе.

Выводы: Проведение на начальном этапе испытаний модели рабочего колеса РУ БРЕСТ-ОД-300 на свинцовом теплоносителе подтвердили неприменимость традиционных расчетных методик для проектирования проточной части осевых насосов перекачивающих ТЖМТ. Экспериментально полученные характеристики проточной части с колесами с семью и четырьмя лопатками рассчитанными по традиционным методикам практически совпали, но существенно отличаются от расчетных характеристик. Опытные данные показывают отсутствие повреждений и разрушений на входных участках лопаток рабочих колес и изменение геометрии и специфичный эрозийный износ выходных участков лопаток.

Ключевые слова: главный циркуляционный насос, напор, расход, осевое колесо, свинцовый теплоноситель, модель.

В НГТУ проводились исследовательские испытания и отработка моделей проточной части ГЦН РУ БРЕСТ-ОД-300 с осевыми рабочими колесами на стендах ФТ-4А НГТУ и ФТ-4 НГТУ.

Тяжелые жидкометаллические теплоносители (Pb, эвтектика Pb-Bi) по своим физическим свойствам существенно отличаются от традиционных теплоносителей (H₂O, Na). Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования, а также опыт создания ГЦН РУ АПЛ проектов 705 и 705К со свинец-висмутовым теплоносителем, показывают, что существующие традиционные методы расчетов насосов непригодны для расчета насосов, перекачивающих ТЖМТ [1].

Испытания на стенде ФТ-4А

Целью исследовательских испытаний на стенде ФТ-4А являлось предварительное определение работоспособности проточной части осевого насоса с подшипниковым узлом. Условия испытаний: рабочее колесо – диаметром $\varnothing 220$ мм, температура свинцового теплоносителя $T = 420-550^\circ\text{C}$; подача насоса ок. 100 т/ч (расч.), напор ок. 2,0 м столба Pb; скорость вращения вала до 1200 об/мин; окружная скорость до 12 м/с, давление на входе в рабочее колесо ок. 0,05 МПа (ок. 0,5 кгс/см² (атм.)).

Какой-либо опыт создания и эксплуатации осевых насосов, перекачивающих высокотемпературные ТЖМТ в мире отсутствовал, испытания рассматривались как предварительные. Поэтому рабочее колесо было выполнено из стали 3, обладающей невысокими характеристиками стойкости в рассматриваемых условиях.

На рис. 1 представлена схема циркуляции теплоносителя в экспериментальном стенде при вращении осевого колеса. На рис. 2 представлена фотография экспериментального участка стенда ФТ-4А.

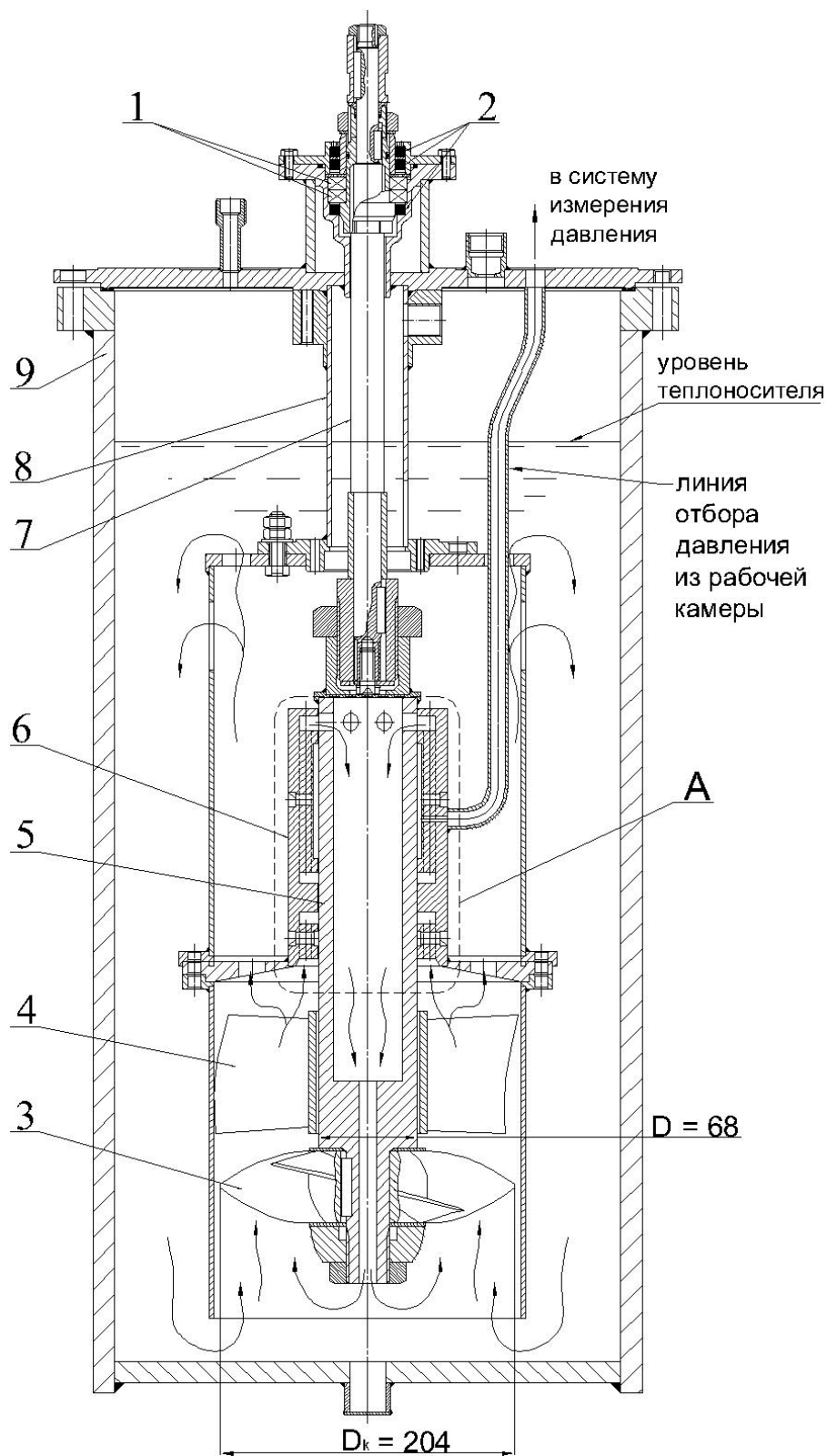


Рис. 1. Схема циркуляции теплоносителя в экспериментальном участке:

- 1 – верхний подшипниковый узел; 2 – узел уплотнения по газу;
 3 – осевое колесо; 4 – спрямляющий аппарат; 5 – имитатор вала ГЦН;
 6 – корпус подшипника; 7 – вал; 8 – корпус съемной части;
 9 – емкость с ТЖМТ



Рис. 2 Фото экспериментального участка (выемной части) стенда ФТ-4А

Циркуляция свинцового теплоносителя в каналах стенда осуществляется следующим образом. При вращении вала осевое колесо подает свинцовый теплоноситель снизу вверх в выпрямляющий аппарат. Выйдя из выпрямляющего аппарата основной поток теплоносителя поднимается вверх до крышки емкости, затем поворачивает на 180°C и опускается на вход рабочего колеса. Расчетные параметры циркуляционного потока высокотемпературного ($400\text{--}550^\circ\text{C}$) потока свинцового теплоносителя при $n=1200$ об/мин – подача – $1000\text{--}1200$ т/ч, напор – ок. $1,5$ м.ст.свинца, давление на входе в рабочее колесо $0,08\text{--}0,05$ МПа ($0,8\text{--}0,5$ кгс/см 2 (ата)). Часть потока с относительно небольшим расходом (ок. $0,5\text{--}0,8$ т/ч) поступает в гидростатический подшипник.

Результаты испытаний на стенде ФТ-4А.

- В первой серии исследований емкость (рис. 1) заполнялась водой при температуре $20\text{--}25^\circ\text{C}$ при атмосферном давлении. Скорость вращения осевого колеса составляла $300, 500, 750, 1000, 1200$ и 1500 об/мин. Время испытаний на каждом режиме для проведения необходимых замеров – около 1 часа.
- Во второй серии исследований (5 циклов) емкость (рис. 1) разогревалась до температуры $450\text{--}470^\circ\text{C}$, заполнялась свинцом, проводился режим формирования оксидных покрытий на сталях в емкости и проводились испытания при скорости вращения осевого колеса $300, 500, 750, 1000$ и 1200 об/мин. Время испытаний на каждом режиме – ок. 1 часа при активности O_2 $a=10^{-1} - 10^0$.
- В третьей серии (25 циклов) из-за отсутствия системы принудительного теплоотвода от свинца исследования проводились циклами. В состав цикла входили:
 - работа насоса в течение $20\text{--}40$ минут с увеличением температуры от 420 до 550°C за счет адиабатического подвода тепла;
 - останов насоса и естественное расхолаживание теплоносителя до 420°C ;
 - включение и работа насоса в течение $20\text{--}40$ минут с увеличением температуры от 420 до 550°C .
- В четвертой серии исследования проводились в режимах, аналогичных второму этапу, но при термодинамической активности O_2 в свинце $a=10^{-4} - 10^{-3}$.
- В пятой серии исследования проводились в режимах, аналогичных второму этапу, но при термодинамической активности O_2 в свинце $a=10^{-5} - 10^{-3}$. Общее число циклов за время исследований - 60 и суммарная продолжительность испытаний - около 80 часов.

После третьего этапа испытаний была проведена ревизия стенда, которая показала следующее:

- лопатки осевого колеса из низкокачественной стали 3 (для провоцирования износа при испытаниях) покрыты защитными оксидными покрытиями черного цвета;
- следы эрозионного износа поверхностей отсутствуют;
- зафиксировано замятие 2-4 мм периферийных кромок лопаток (рис. 3) по ходу потока; Возможной причиной замятия кромок является то, что толщина лопатки в данном сечении 1 мм и менее и низкие прочностные характеристики стали 3 при температуре 550 °С;
- следы эрозионного износа лопаток из выправляющего аппарата из стали 08X18H10T- отсутствуют (рис. 4).

После ревизии загнутые периферийные участки были удалены. После четвертой и пятой серий исследований состояние поверхностей проточной части насоса не изменилось. Какие-либо следы кавитационного износа после всех испытаний отсутствовали. Изменения акустических характеристик, аналогичных кавитационным, отсутствовали.

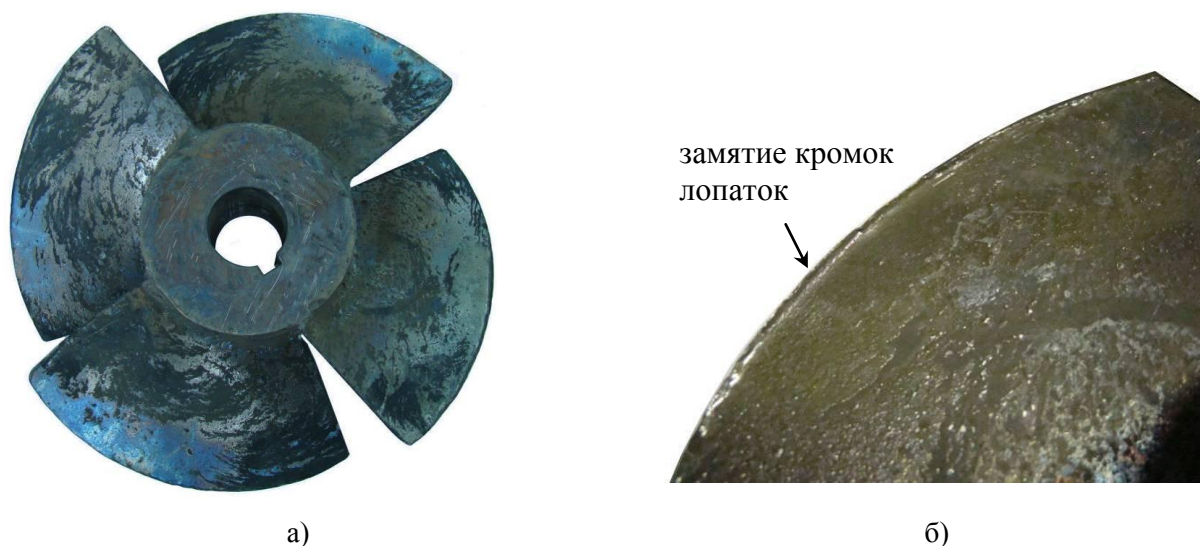


Рис. 3. Осевое колесо после третьего этапа:
а – осевое колесо; *б* – лопатка осевого колеса с замятым краем

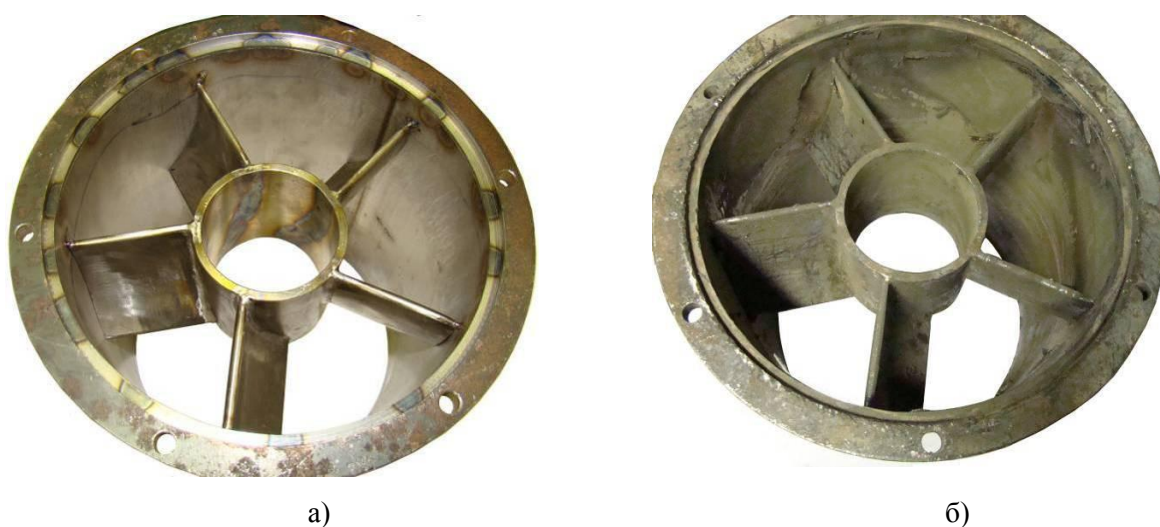


Рис. 4. Спрямляющий аппарат:
а – до испытаний; *б* – после испытаний на свинце после третьего этапа

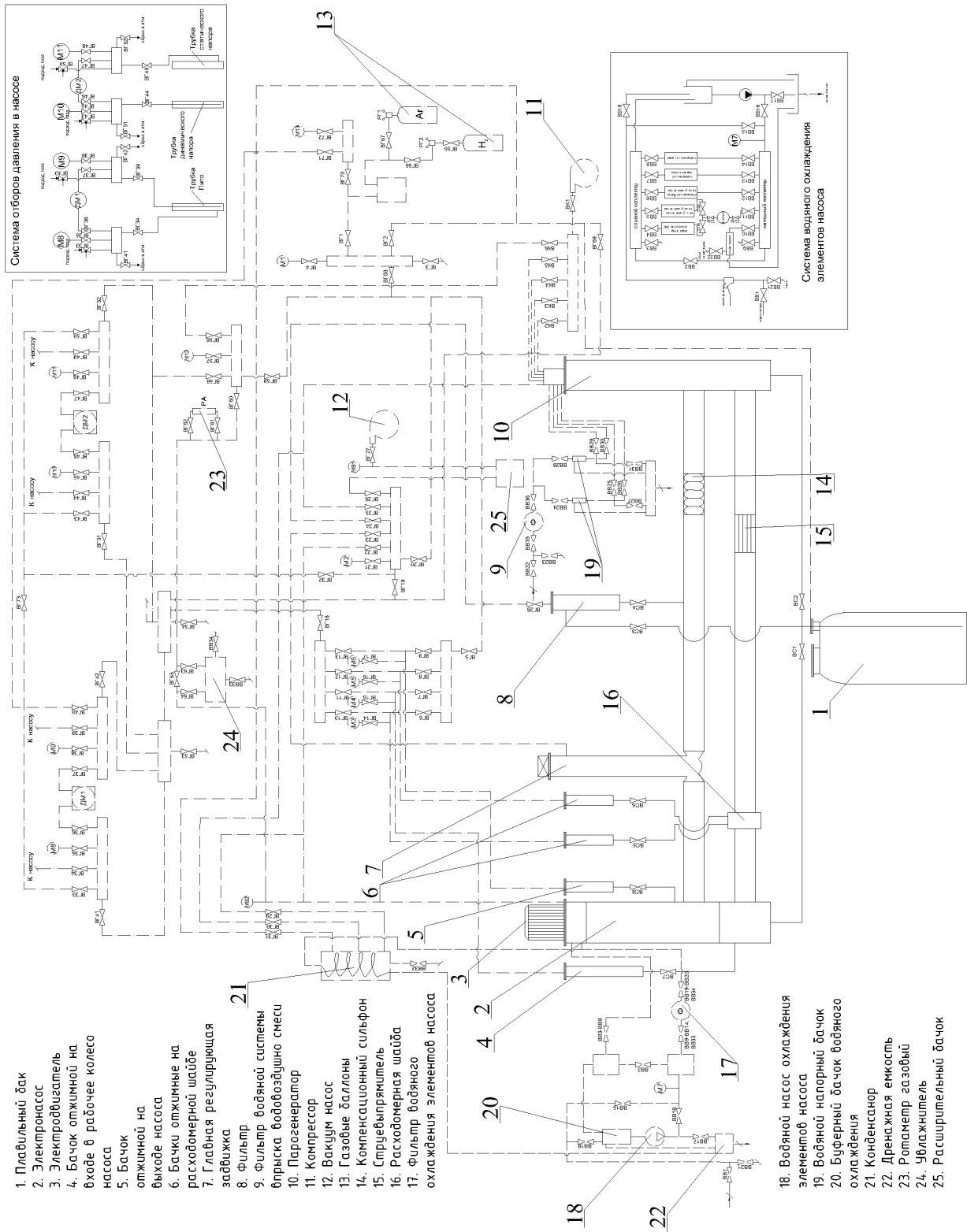


Рис. 5. Основные характеристики стенда ФТ-4 НГТУ

Во всех сериях испытаний (на воде и на свинце) во всех режимах производилось фиксирование нагрузки (тока) на электродвигатель: - на воде ($N=7,8$ кВт, $n_{ном}=1455$ об/мин), на свинце ($N=45$ кВт, $n_{ном}=2960$ об/мин).

Не зафиксированы изменения нагрузки на электроприводе насоса, соответствующие признакам возникновения развитой кавитации в среде свинцового теплоносителя.

Проведенные исследования подтвердили принципиальную возможность создания осевого насоса, включающего гидростатический подшипник. Дальнейшие исследования кавитационных характеристик проточных частей осевых насосов конструкций НГТУ и ЦКБМ проводились на стенде ФТ-4 НГТУ.

Основные характеристики стенда ФТ-4 НГТУ (рис. 5)

1. Теплоноситель – расплав свинца марки С0 ГОСТ 3778-98.
2. Масса теплоносителя 1×10^4 кг.
3. Температура свинцового теплоносителя – 450 – 500 °С, кратковременно 550°С.
4. Расход теплоносителя, максимальный до $2.0 \cdot 10^3$ кг/час (до 200 м³/час).
5. Термодинамическая активность кислорода в свинцовом теплоносителе 10-5-10-4 до 100 плюс твердая фаза оксидов свинца.
6. Привод электронасоса – электродвигатель асинхронный, 2 шт., пном=1500 об/мин и 3000 об/мин, Nном до 50 кВт, с частотным регулированием скорости вращения.
7. Мощность электро-нагревательных спиралей стенда, суммарная до 100 кВт, напряжение 380/220 В.
8. Подшипник скольжения электронасоса контура свинцового теплоносителя на первом этапе – гидростатический щелевого типа.
9. Рабочее колесо и выпрямляющий аппарат – сменные, 2 компонента ЦКБМ и 2 компонента НГТУ.
10. Газ в системе газа: аргон, водород, аргоно-водородная и аргоно-кислородная смеси.
11. Система обогрева оборудования и трубопровода контура свинцового теплоносителя – электрическая, нихромовыми спиралями с кордиеритовыми бусами.

Дальнейшие работы проводились на специально созданном стенде ФТ-4 НГТУ по двум направлениям:

- отработка моделей конструкции ЦКБМ проточной части ГЦН БРЕСТ-ОД-300;
- проведение исследовательских испытаний моделей конструкций НГТУ проточной части осевого насоса применительно к ГЦН БРЕСТ-ОД-300 с целью разработки представительных методов расчета проточной части осевых насосов, перекачивающих высокотемпературные ТЖМТ, а также отработки этих моделей конструкций, применительно к ГЦН РУ БРЕСТ-ОД-300.

Основные характеристики стенда ФТ-4 НГТУ (рис. 5).

Электронасос стенда НСО-01 НГТУ предназначен для проведения испытаний и отработки проточных частей моделей ГЦН РУ БРЕСТ-ОД-300, входящих в состав электронасоса, для обеспечения циркуляции по основному циркуляционному контуру стенда, а также для проверки конструктивных решений и отработки гидростатического подшипника, входящего в состав электронасоса.

Проточная часть электронасоса НСО-01 включает в себя сменные участки моделей (поставки ЦКБМ и НГТУ): входной патрубков; рабочее колесо и выпрямляющий аппарат. Участок модели проточной части от выпрямляющего аппарата и нижней части трубы постоянного напора входит в состав НСО-01 НГТУ и является несменным (постоянным). Участок верхней части трубы постоянного напора модели и устройства поворота потока входит в состав НСО-01 при испытаниях мог демонтироваться.

Испытания 2013 года с проточной частью ЦКБМ включали в себя следующие этапы:

- кавитационные испытания;
- определение напорно-расходных и энергетических характеристик с установленной верхней частью и устройством поворота потока;
- определение напорно-расходных и энергетических характеристик с демонтированной верхней частью трубы постоянного напора и устройством поворота потока;
- ресурсные испытания.

Проведение кавитационных испытаний позволило определить режим возникновения кавитации (газовой) и его характеристики. Напорно-расходные и энергетические испытания

моделей, спроектированных по традиционным методикам, показали, как и следовало ожидать существенное расхождение характеристик испытаний на свинце с расчетами. После испытаний на третьем и четвертом этапах выявлено изменение геометрии (загиб) выходных кромок всех лопаток и появление на них эрозионного износа (рис. 7).

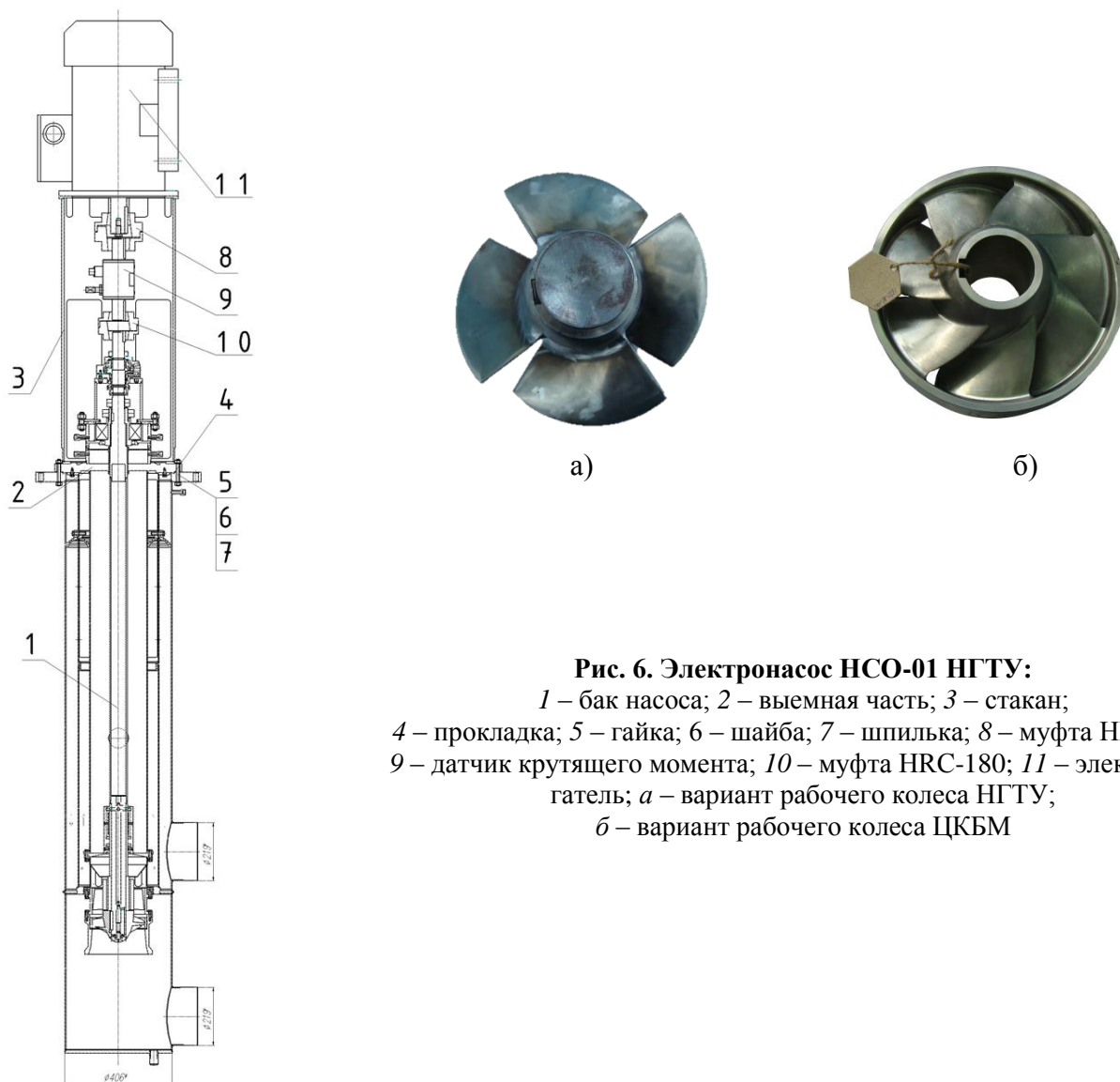


Рис. 6. Электронасос НСО-01 НГТУ:

1 – бак насоса; 2 – выемная часть; 3 – стакан;
 4 – прокладка; 5 – гайка; 6 – шайба; 7 – шпилька; 8 – муфта НРС-150;
 9 – датчик крутящего момента; 10 – муфта НРС-180; 11 – электродвигатель;
 а – вариант рабочего колеса НГТУ;
 б – вариант рабочего колеса ЦКБМ



Рис. 7. Эрозионный износ выходных кромок лопаток после ресурсных испытаний

В процессе испытаний по определению влияния осевого зазора между рабочим колесом и выпрямляющим аппаратом конструкции модели НГТУ в результате аварийного самопроизвольного откручивания гаек на болтах крепления входного патрубка произошло совместное вращение рабочего колеса и входного патрубка ($n=1200$ об/мин) со смещением на ок. 3,0 мм с осью последнего. Заклинивание вала насоса, развитие и протекание аварии привело к разрушению выходных участков лопаток рабочего колеса (рис. 8, 9).



Рис. 8. Разрушение лопаток колеса



Рис. 9. Разрушение ступицы колеса

Заключение

1. Проведение на начальном этапе испытаний модели рабочего колеса РУ БРЕСТ-ОД-300 на свинцовом теплоносителе подтвердили неприменимость традиционных расчетных методик для проектирования проточной части осевых насосов перекачивающих ТЖМТ.

Экспериментально полученные характеристики проточной части с колесами с семью и четырьмя лопатками, рассчитанными по традиционным методикам, практически совпали, но существенно отличаются от расчетных характеристик.

2. Опытные данные показывают отсутствие повреждений и разрушений на входных участках лопаток рабочих колес и изменение геометрии и специфичный эрозионный износ выходных участков лопаток.

*Дата поступления
в редакцию 20.11.2014*

A.V. Beznosov, P.A. Bokov, A.D. Zudin, A.V. Lvov, T.A.Bokova, N.D. Trushkov

HYDRODYNAMICS AND PERFORMANCE OF MODEL THE MAIN CIRCULATION PUMP BREST-OD-300 LEAD COOLANT ON BENCH FT-4 NNSTU

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

Purpose: The purpose of the investigation tests on the FT-4A bench was to preliminarily measure performance of the flow part of the axial pump having a bearing unit. The NNSTU has carried out investigation tests and developments of the main circulation pump flow part of the BREST-OD-300 reactor plant with axial impellers on benches FT-4A NNSTU and FT-4 NNSTU.

Design/methodology/approach: At the NNSTU n.a. R.E. Alekseyev, the NNSTU FT-4 bench has been designed and manufactured, which allows conducting comprehensive studies of the characteristics of model flow parts of axial type having different designs at the following basic parameters: coolant – lead having a temperature up to 550°C; pump model flow rate – up to 2,000 t/h; pump head – up to 1.5 m.3)

Findings The conducted investigations proved the possibility in principle of creating an axial pump including a hydrostatic bearing. Further research of cavitation performance of axial pump flow parts designed by the NNSTU and the Central Mechanical Engineering Design Bureau was carried out on the FT-4 NNSTU bench.

Research limitations/implications: The tests carried out in 2013 with regard to the flow part designed by the Central Mechanical Engineering Design Bureau included the following stages:

- cavitation tests;
- determination of head-and-rate and energy characteristics with the upper part and flow turning device installed;
- determination of head-and-rate and energy characteristics with the constant head pipe upper part and flow turning device removed;
- endurance tests.

The cavitation tests made it possible to determine conditions of incipient cavitation (gaseous) and their characteristics.

The head-and-rate and energy tests of models designed according to the conventional techniques showed, as could be expected, a material inconsistency in characteristics of tests on lead with the design calculations.

After the tests at Stages 3 and 4, there was detected a change in geometry (bend) of the trailing edges of all vanes and appearance of erosive wear on them.

Originality/value: The initial-stage testing of the impeller model of the BREST-OD-300 reactor plant running on a lead coolant has confirmed inapplicability of the conventional design procedures for the flow part of axial pumps pumping heavy liquid-metal coolants.

The experimentally obtained characteristics of the flow part with impellers having seven and four vanes designed according to the conventional techniques have virtually coincided, but they greatly differ from the design characteristics.

The experimental findings show no damage or destruction at the inlet areas of the impeller vanes and changes in geometry and specific erosive wear of the impeller vane trailing areas.

Key words: main circulation pumps, head, expenses, axial wheel, lead coolant, model.