
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.039

А.В. Безносков, Т.А. Бокова, Н.С. Лукичѳв, В.А. Гадетов, А.Г. Мелузов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ПРИ ТРЕНИИ РАСПЛАВА СВИНЦА О ВАЛ НАСОСА, И ГЕОМЕТРИИ ЕГО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВРАЩАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предмет, тема, цель работы: В НГТУ проводятся экспериментальные исследования с целью определения потерь мощности при трении расплава свинца о вал насоса, и геометрии его свободной поверхности при вращательном движении.

Метод или методология проведения работы: Для обоснования концепции авторами было предложено рассмотреть вопросы: создания стенда ТВС-2015 для изучения характеристик трения вала насоса в среде ТЖМТ, проведения исследования влияния трения вала насоса в трех различных средах (в воде, в воздухе, в жидком свинце) для последующих сравнительных анализов, расчетного обоснования потерь мощности, связанных с потерями на трении вала циркуляционного осевого насоса в среде ТЖМТ, получения и обоснования данных, отображающих поведение свободной поверхности теплоносителя при вращении имитатора вала насоса, геометрическое построение свободной поверхности теплоносителя по определенной функции, создания базы данных расчетно-теоретических характеристик подтвержденных экспериментальным исследованием по влиянию трения вала на потери мощности электродвигателя.

Результаты и область их применения: Новые решения позволяют повысить экономичность энергоблока за счет уменьшения массогабаритных характеристик реакторного контура.

Полученные результаты исследований потерь, испытаний геометрии свободной поверхности показали существенные различия полученных характеристик. Данные испытаний являются основополагающими для усовершенствования осевых циркуляционных насосов для установки БРЕСТ ОД 300.

Выводы: Результаты исследований мощностных потерь, а также испытаний геометрии свободной поверхности показали существенные различия полученных характеристик на водяном и свинцовом теплоносителе, а также при разных уровнях заполнения. Полученные данные показали линейную зависимость при различных оборотах вращения вала насоса при уровне заполнения теплоносителем в 1500 мм. Ревизия экспериментального участка показала минимальные различия шероховатости поверхностей имитатора вала до и после проведения экспериментов.

Ключевые слова: свинцовый теплоноситель, потеря мощности, КПД установки, геометрия свободной поверхности, трение свинцового теплоносителя о вал.

По принципу действия насосы для перекачки тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) выполняются только динамические [1]. В настоящее время конструкции объемных насосов для ТЖМТ или их проработки отсутствуют. Принципиальная возможность создания объемных насосов роторного типа (шестеренных и др.) не исключена для условий подач теплоносителя с малыми расходами и высокими напорами [2].

В динамическом насосе, в результате действия сил инерции и вязкости перекачиваемой среды внутри рабочего пространства насоса, кинетическая энергия от рабочего колеса передается перекачиваемой жидкости, в основном преобразуясь в энергию давления. Традиционно для любой гидравлической машины полный КПД определяется из выражения:

$$\eta = \eta_{\text{г}} * \eta_{\text{об}} * \eta_{\text{мех}},$$

где η – гидравлический КПД; $\eta_{\text{об}}$ – объемный КПД; $\eta_{\text{мех}}$ – механический КПД.

Если для расчета объемных и механических потерь и, следовательно, для определения соответствующих КПД имеются некоторые теоретические методы, проверенные опытом, то гидравлические потери почти не поддаются расчету.

В межлопастных каналах рабочего колеса насоса имеются не только потери на трение о стенки, вычисление которых уже представляет довольно сложную задачу, но также потери на вихреобразование, обычно являющиеся главной составляющей гидравлических потерь. Кроме этого, в состав гидравлических потерь входят потери, связанные с отрывом потока от обтекаемой поверхности, потери при резком расширении канала на повороте и т.д. не зная действительных значений скоростей течения и их распределения в различных сечениях рабочего колеса, большинство из этих потерь подсчитать практически невозможно. Это особенно актуально с учетом использования в качестве перекачиваемой жидкости ТЖМТ [3].

Необходимое для оценки работы насоса значение полного КПД может быть найдено лишь в результате специальных опытных исследований.

Поскольку с КПД связаны все другие показатели работы насоса, то совершенно необходимо проведение испытаний при различных значениях напора и подачи, изменяющихся от минимальных значений до максимальных. Такие испытания обычно называют параметрическими, поскольку по их результатам определяют напорную и энергетическую характеристики насоса, дающие полное представление о его работе [4].

Непосредственные испытания насосов позволяют также установить особенности их работы на режимах, которые недостаточно поддаются расчету. К ним в первую очередь относятся исследования работы машины в условиях развившейся кавитации. Испытания для получения напорной и энергетической характеристик традиционно проводят с соблюдением мер, исключающих полностью возникновение кавитации или, по крайней мере, ограничивающих ее развитие до пределов, не оказывающих практического влияния на работу насоса.

Испытания насосов приобретают особую важность в тех случаях, когда приходится разрабатывать насос новой конструкции, особенно для перекачки жидкостей (свинцового теплоносителя), аналоги и прототипы которых отсутствуют.

В большинстве случаев насосы по габаритам, подаче и мощности таковы, что их целесообразно испытывать в натурных размерах. Если насосы имеют значительные размеры при больших подачах и мощности, а также испытания которых дороги, то требуется проведение модельных испытаний. Определение энергетических параметров насосов при этом в значительной степени усложняется из-за необходимости точного моделирования самой машины и режимов ее работы, а также обязательного пересчета полученных результатов.

К специфичным свойствам свинцового теплоносителя, определяющим процессы в проточной части насосов, перекачивающих ТЖМТ, относятся [5]:

- низкое давление насыщенного пара $1,44 \times 10^{-17}$ Па при $t = 127$ °С, $5,38 \times 10^{-5}$ Па при $t = 527$ °С;
- высокая температура кипения $t_{\text{кип}} = 1750$ °С при атмосферном давлении, в условиях реакторного контура – больше;
- большее чем у воды, поверхностное натяжение $\sigma \approx 400$ н/м при $t = 350$ °С;
- существенно большая плотность $\rho = 10,5 \times 10^{-3}$ кг/м³ при $t = 450$ °С, определяющая силы инерции в потоке;
- теплопроводность $\lambda = 16,58$ Вт/мК при $t = 400$ °С, большая чем у воды, но меньшая чем у натрия;
- кинематическая вязкость $\nu \approx 20,99 \times 10^{-8}$ м²/с при $t = 400$ °С;
- несмачиваемость поверхности сталей и чугунов с нанесенными на них защитными оксидными покрытиями; краевой угол смачивания оксидированных сталей (в среде сухого аргона) составляет $\Theta = 110 - 120^\circ$.

Характеристика взаимодействия (сцепления) свинца с поверхностями окисленной стали и чугуна (работа адгезии) существенно меньше характеристики взаимодействия (сцепления) молекул свинца (работы когезии) между собой. У натрия и воды эти соотношения противоположны.

На частичках примесей могут концентрироваться газы (парогазовые смеси), которые при уменьшении давления в потоке увеличиваются в объеме и могут рассматриваться как зародыши кавитационных пузырей.

В потоке свинца в реальном контуре всегда имеются нерастворенные твердые частицы примесей – оксидов свинца, оксидов и других соединений компонентов конструкционных материалов, образующие ядра кавитации и определяющие их число. В трещинах этих частиц, которые являются гидрофобными по отношению к свинцу, находятся газы (парогазовые смеси), которые при понижении давления могут формировать разрывы сплошности в свинце – пузырьки газа, которые затем агломерируют [6, 7].

Температура кипения свинца превышает температуру плавления сталей – конструкционных материалов реакторного контура, что в отличие от воды и натрия, исключает образование паровых пленок, пузырей, как на теплопередающих поверхностях (оболочках ТВЭЛ), так и в объеме теплоносителя.

Анализ свойств свинцового теплоносителя показывает, что условия реакторных контуров с этим теплоносителем существенно отличаются от условий реакторных контуров с традиционными теплоносителями (вода, натрий).

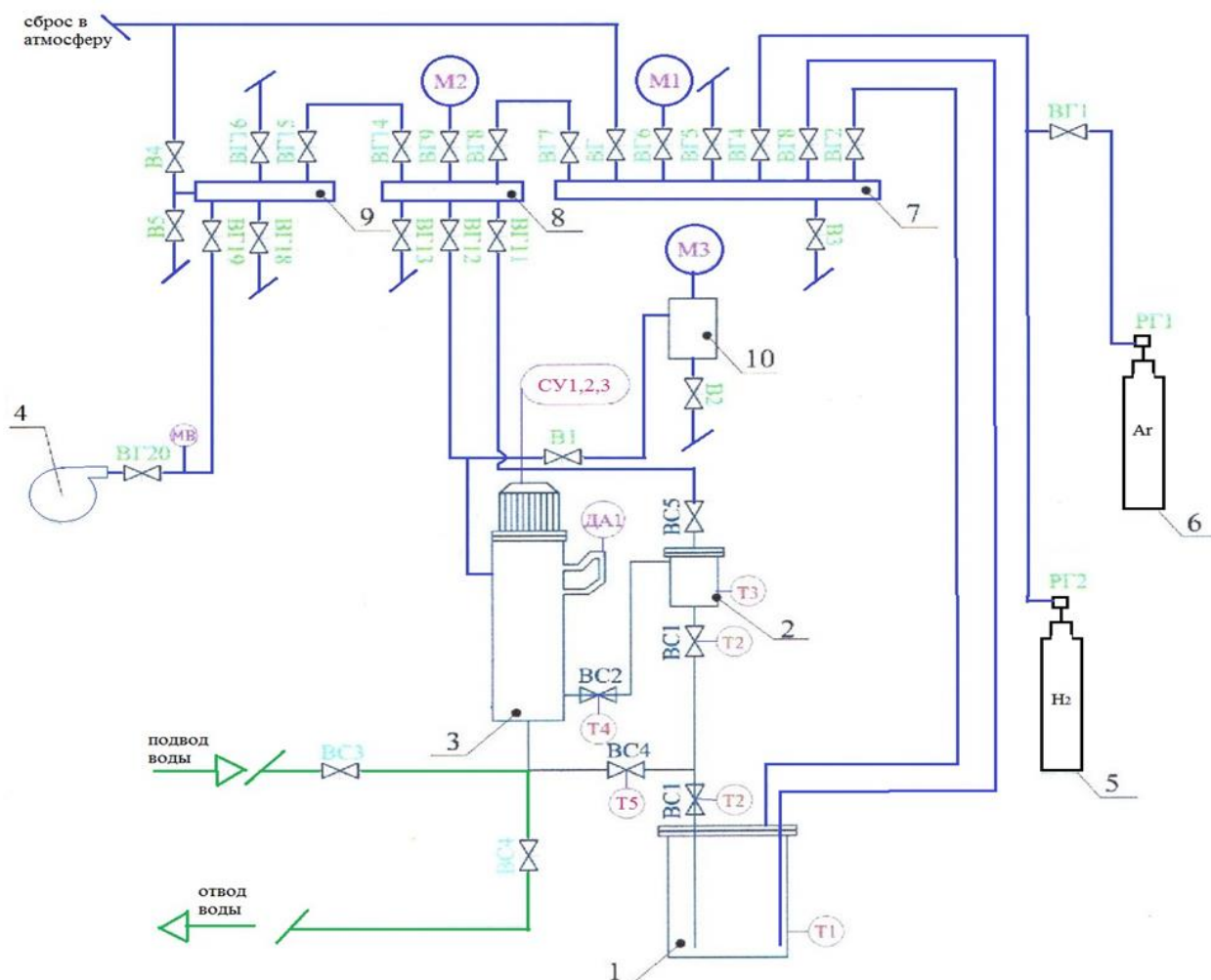


Рис. 1. Схема экспериментального стенда ТВС-2015:

1 - бак плавильный 2,5 м³; 2 - фильтр; 3 - экспериментальный участок; 4 - вакуумный насос; 5 - баллон водородный; 6 - баллон аргонный; 7, 8, 9 - коллекторы давления; 10 - конденсатор

В представляемой работе рассматриваются осевые циркуляционные насосы, которые на данный момент заявлены основными для перекачки свинцового теплоносителя для реакторной установки БРЕСТ ОД 300 [8-10].

Вторым важным моментом в работе является изучение поведения свободной поверхности расплава свинца, как будет выглядеть геометрия воронки при вращательном движении имитатора вала.

Соответственно целью работ являлось получение базы данных по мощностным потерям на поверхность вала, а также построение геометрии свободной поверхности теплоносителя при вращательном движении имитатора вала.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- разработать экспериментальный стенд с использованием водяного и тяжелого высокотемпературного жидкометаллического теплоносителей и методики для проведения на них сравнительного анализа полученных данных;
- провести сравнительные экспериментальные и расчетно-теоретические исследования мощностных потерь на воде и на высокотемпературном жидкометаллическом теплоносителе;
- провести исследования по получению геометрии свободной поверхности тяжелого высокотемпературного жидкометаллического теплоносителя, и провести анализ полученных данных;

Целью работ первого этапа является сравнительное экспериментальное исследование мощностных потерь имитатора вала на свинцовом и на водяном теплоносителях.

На рис. 1 представлена схема стенда для сравнительных экспериментальных исследований мощностных потерь по поверхности имитатора вала на свинцовом и на водяном теплоносителях.

Стенд ТВС-2015 в базовой комплектации предназначен для проведения исследований характеристик взаимодействия: вращающийся вал – среда, в трех различных средах: вода, воздух, жидкий свинец.

Задачами работ, выполняемых на стенде ТВС-2015, являются:

1. Создание стенда ТВС-2015 для изучения характеристик трения вала насоса в среде ТЖМТ;
2. Проведение исследования влияния трения вала насоса в трех различных средах для последующих сравнительных анализов;
3. Расчетное обоснование потерь мощности, связанных с потерями на трении вала циркуляционного осевого насоса в среде ТЖМТ;
4. Получение и обоснование данных, отображающих поведение свободной поверхности теплоносителя при вращении имитатора вала насоса, геометрическое построение свободной поверхности теплоносителя по определенной функции;
5. Создание базы данных расчетно-теоретических характеристик, подтвержденных экспериментальным исследованием по влиянию трения вала на потери мощности электродвигателя.

Основные характеристики стенда ТВС-2015:

- Теплоноситель – расплав свинца марки С0 ГОСТ 3778-98;
- Температура свинцового теплоносителя – 450 – 500 °С, кратковременно 550 °С;
- Термодинамическая активность кислорода в свинцовом теплоносителе от 10^{-5} - 10^{-4} до 10 плюс твердая фаза оксидов свинца;
- Газ в системе газа: аргон, водород, аргоно-водородная и аргоно-кислородная смеси;
- Привод – электродвигатель асинхронный, 1 шт., $n_{ном}=1500$ об/мин, $N_{ном}$ до 11 кВт, с частотным регулированием скорости вращения;
- Система обогрева оборудования и трубопровода контура свинцового теплоносителя – электрическая, нихромовыми спиралями с кордиеритовыми бусами;
- Мощность электронагревательных спиралей стенда, суммарная до 100 кВт, напряжение 380/220 В.

На рис. 2 представлен экспериментальный участок, выполненный в виде насоса, но от насоса отличается тем, что не перекачивает теплоноситель, а лишь имитирует движение вала.

Имитатор вала сделан из трубы 104x2 материал 12X18Н10Т, на конце имитатора вала расположена заглушка с углублением под нижний упорный подшипник, который в свою очередь сделан в виде пяты и подпятника.

Методика испытаний заключалась в следующем, вводился экспериментальный участок, и устанавливалась скорость вращения его имитатора вала от 150 до 600 об/мин, с увеличением на 50 об/мин, выдерживалось время 5 мин, и производилось списание показаний датчика момента вращения, мощности двигателя, также эти замеры происходили на четырех уровнях заполнения, 1-й уровень 100 мм, 2-й 500 мм, 3-й 1000 мм, 4-й 1500 мм. После проведения экспериментальных исследований имитатора вала насоса в среде жидкометаллического и водяного теплоносителя на стенде ТВС-2015 были получены данные, по которым были проведены расчётные обоснования потерь мощности вала о теплоноситель.

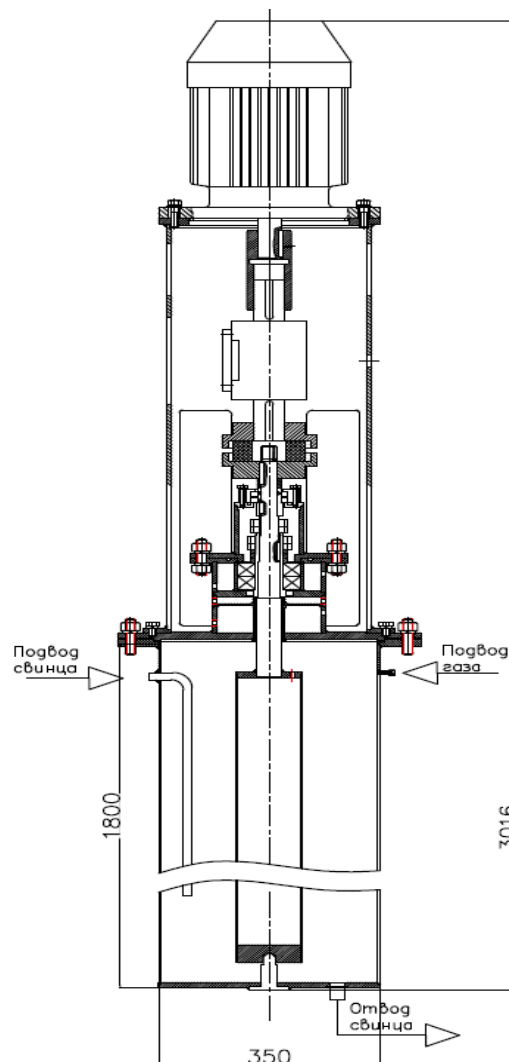


Рис. 2. Схема экспериментального участка

Расчётное обоснование потерь мощности вала о свинцовый и водный теплоноситель проводилось следующим образом:

Расчёт потребляемой мощности при вращательном движении:

$$N = M * \omega = \frac{2\pi * M * n}{60};$$

где M – момент силы; ω – угловая скорость; π – число пи; n – частота вращения (число оборотов в минуту, об/мин.).

В результате полученных данных, принимая во внимание, что при уровне заполнения в 100 мм нижний упорный подшипник полностью находится в свинце, а при уровне заполнения в 1500 мм экспериментальный участок полностью находится в свинце теплоносителя, видно, что потери мощности на валу равны разнице между потерями на двух уровнях заполнения, а именно:

Для наглядности можно представить график (рис. 3), на котором чётко видно, что зависимость мощности на валу, без учёта нижнего подшипника от числа оборотов линейная.

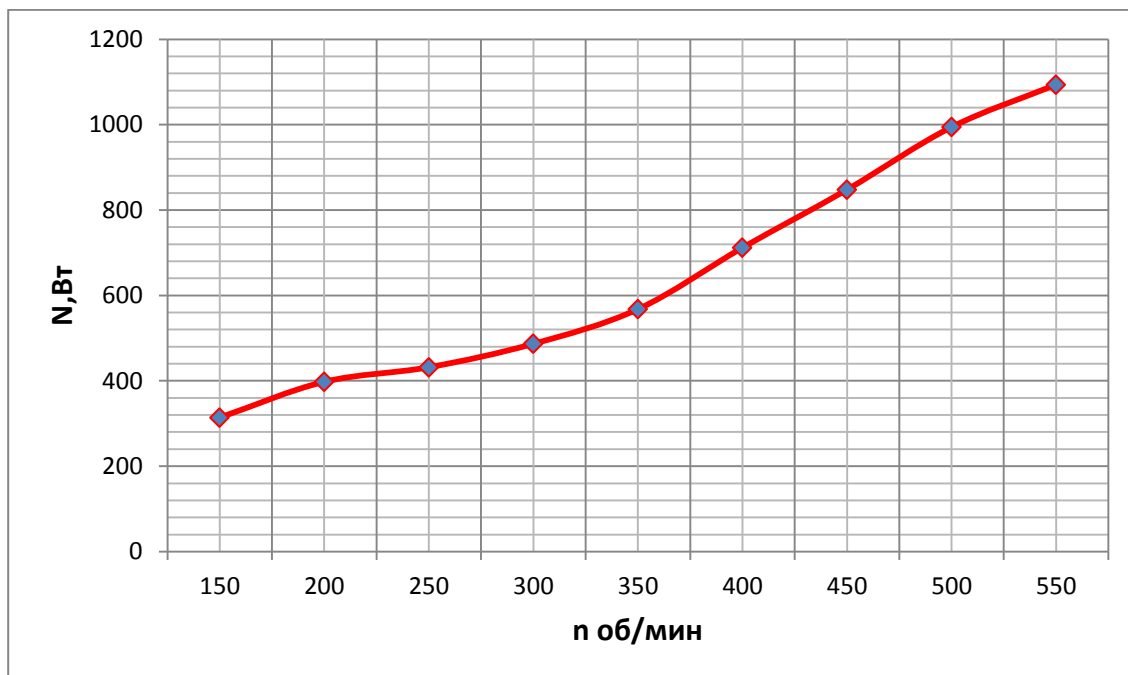


Рис. 3. Зависимость мощности на валу насоса от числа оборотов

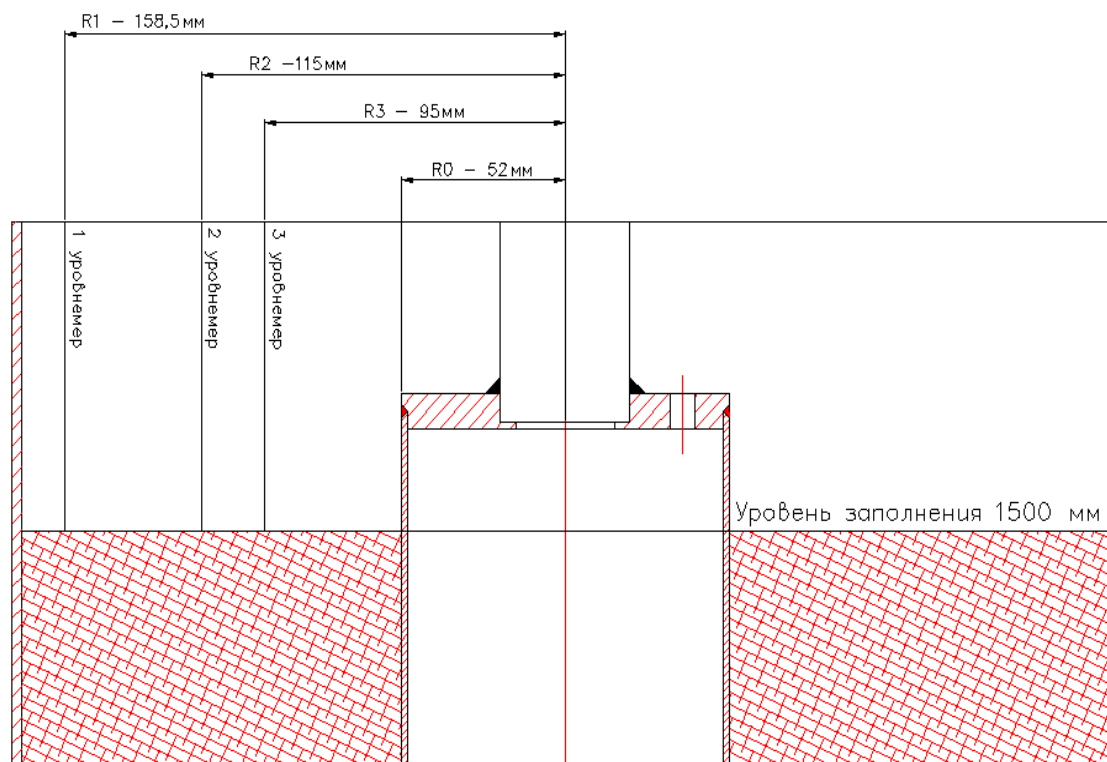


Рис. 4. Расположение уровнемеров на 1-м этапе

Экспериментальные исследования геометрии свободной поверхности свинцового теплоносителя состояли из двух последовательных этапов.

1 этап. Использовались три одноконтактных уровнемера для получения геометрии свободной поверхности свинцового теплоносителя, которые располагались на расстоянии от центра вала следующим образом (рис. 4):

$R1 - 158,5 \text{ мм};$

$R2 - 115 \text{ мм};$

$R3 - 95 \text{ мм};$

$R0 - 52 \text{ мм}.$

2 этап. Использовались два трехконтактных уровнемера для получения геометрии свободной поверхности свинцового теплоносителя, которые располагались на расстоянии от центра вала, следующим образом (рис. 5):

$R1 - 158 \text{ мм};$

$R2 - 80 \text{ мм};$

$R0 - 52 \text{ мм}.$

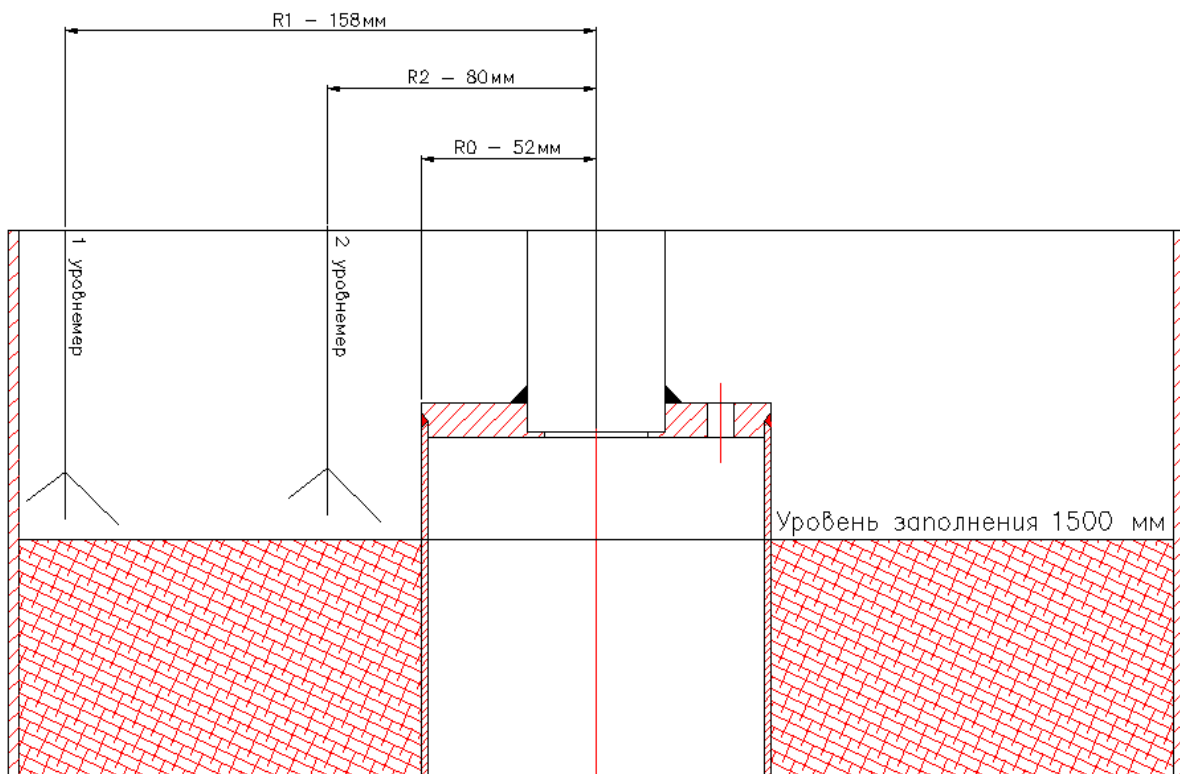


Рис. 5. Расположение уровнемеров на 2-м этапе

Уровень заполнения бака экспериментальной сборки:

I уровень заполнения 500 мм от дна бака экспериментальной сборки,

II уровень заполнения 1000 мм от дна бака экспериментальной сборки,

III уровень заполнения 1500 мм от дна бака экспериментальной сборки.

Давление в системе газа $P_T = 1,1 \text{ кгс/см}^2$ (со свинцовым теплоносителем).

Температура свинцового теплоносителя $T_{Pb} = 450-480 \text{ }^\circ\text{C}$, кратковременно $550 \text{ }^\circ\text{C}$.

Частота вращения имитатора вала от 150 об/мин до 600 об/мин, при повышении на 50 об/мин.

Анализ сравнительной зависимости высоты свободной поверхности теплоносителя (H) от расстояний расположения сигнализаторов уровня (R) от центральной оси экспериментального участка и скорости вращения имитатора вала (n) (рис. 6-8) на 1-м

и 2-м этапах, при уровне заполнения бака насоса свинцовым теплоносителем на 1500 мм показывает следующее:

При стояночном режиме на водороде в течение 10 ч налипание на поверхность имитатора вала отсутствует, что доказывает наличие на 1-м этапе оксидных масс.

При уровнях заполнения в 1000 и 500 мм следуют такие же выводы.

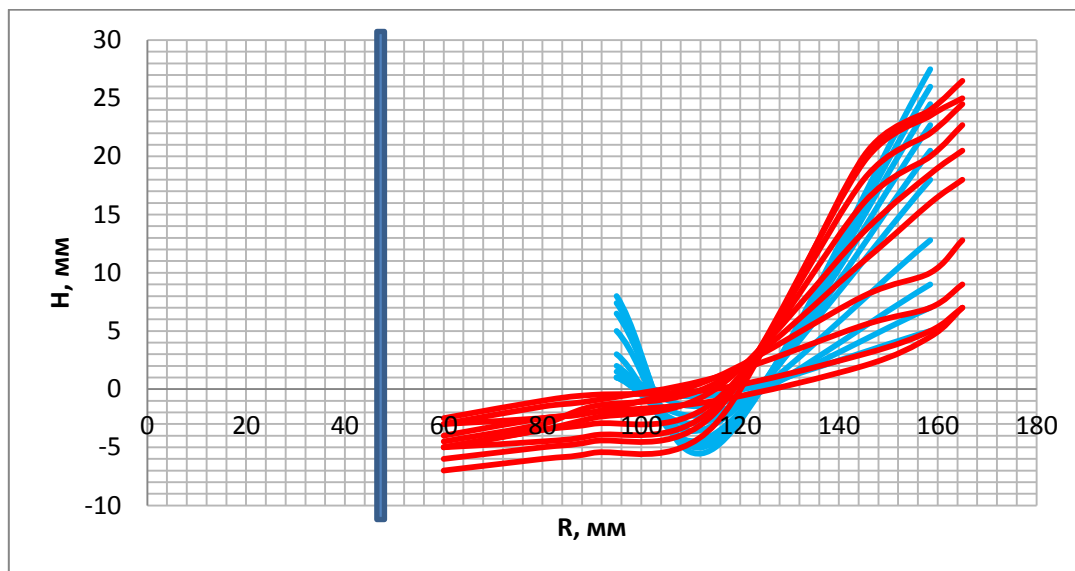


Рис. 6. Сравнительная зависимость высоты свободной поверхности теплоносителя (H) от расстояний расположения сигнализаторов уровня (R) и скорости вращения имитатора вала (n) при уровне заполнения 1500 мм

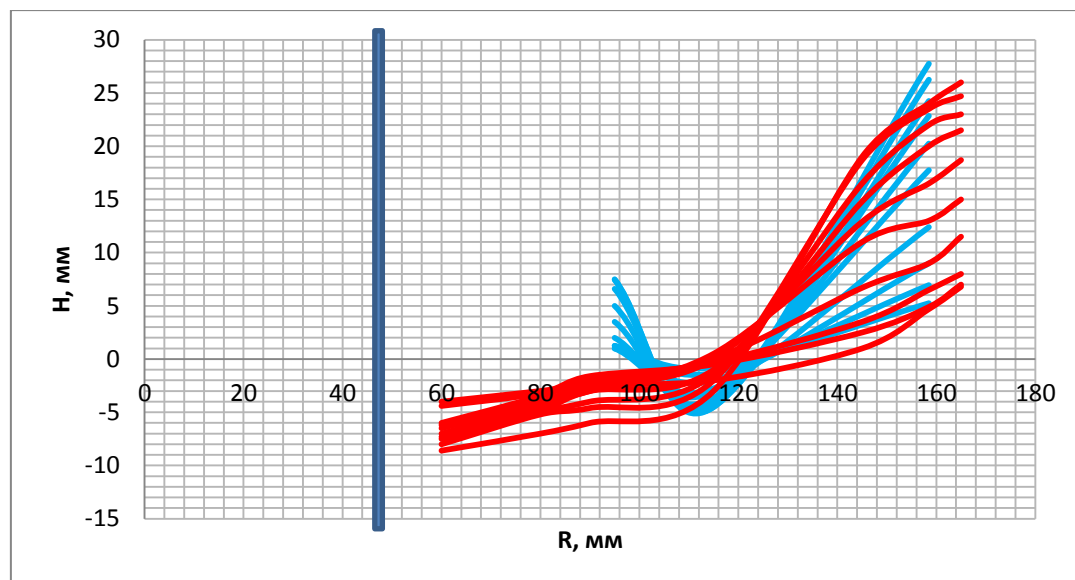


Рис. 7. Сравнительная зависимость высоты свободной поверхности теплоносителя (H) от расстояний расположения сигнализаторов уровня (R) и скорости вращения имитатора вала (n) при уровне заполнения 1000 мм

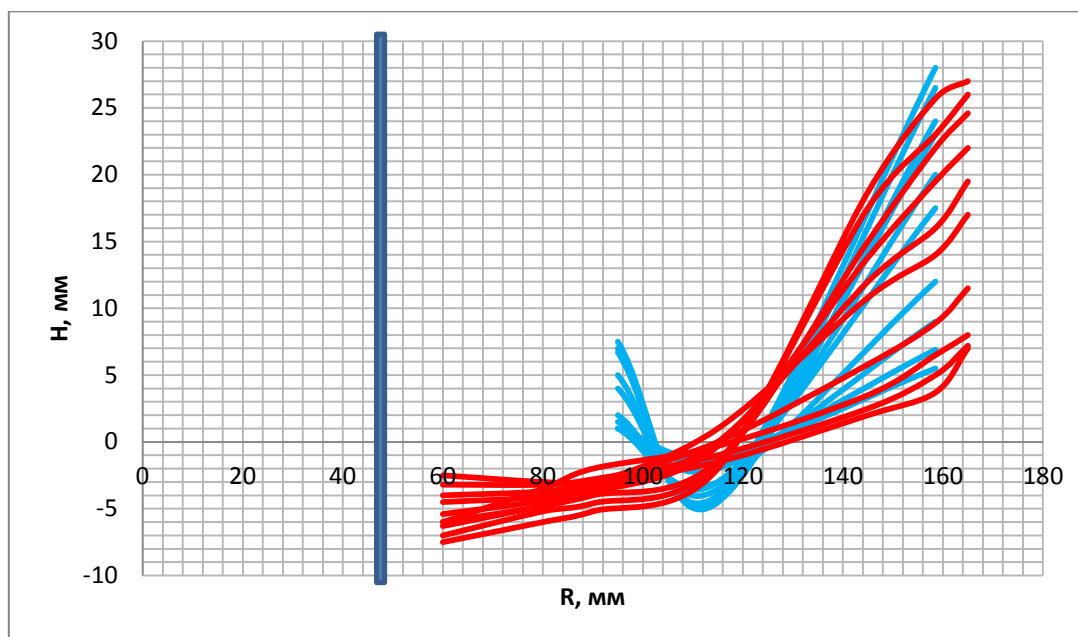


Рис. 8. Сравнительная зависимость высоты свободной поверхности теплоносителя (H) от расстояний расположения сигнализаторов уровня (R) и скорости вращения имитатора вала (n) при уровне заполнения 500 мм

Заключение

Результаты исследований *мощностных потерь* показали существенные различия полученных характеристик на водяном и свинцовом теплоносителе, а также при разных уровнях заполнения. Полученные данные показали линейную зависимость при различных оборотах вращения вала насоса при уровне заполнения теплоносителем в 1500 мм. Ревизия экспериментального участка показала минимальные различия шероховатости поверхностей имитатора вала до и после проведения экспериментов.

Результаты испытаний *геометрии свободной поверхности* показали существенные различия полученных характеристик на водяном и свинцовом теплоносителе, а также при разных уровнях заполнения. Полученные данные показали линейную зависимость при различных оборотах вращения вала насоса при уровне заполнения теплоносителем в 1500 мм. Ревизия экспериментального участка показала минимальные различия шероховатости поверхностей имитатора вала до и после проведения экспериментов.

Библиографический список

1. **Пфлейдерер, К.** Лопаточные машины для жидкости и газа / К. Пфлейдерер. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1960. – 685 с.
2. **Карелин, В.Я.** Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах В.Я. Карелин. – М.: Машинстроение, 1975. – С. 5–20; – С. 57–79.
3. **Beznosov, A.V.** Technologies and Major Equipment of Circuits Cooled with Pb, Pb-Bi LAP LAMBERT / A.V. Beznosov, T.A. Vokova, P.A. Vokov // Academic Publishing (2015-01-27)
4. **Безносков, А.В.** Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М.: ИздАТ, 2006. – 370 с.
5. **Безносков, А.В.** Специфика циркуляционных насосов реакторных контуров со свинцовым и свинецвисмуттовым теплоносителями, / А.В. Безносков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2009. – № 4. – С. 155–160.
6. **Безносков, А.В.** Особенности гидродинамики свинцового и свинцово-висмуттового теплоносителей / А.В. Безносков [и др.] // Атомная энергия. – 2010. – Т. 109. – № 2. – С. 72–76.
7. **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.
8. **Боков, П. А.** Исследование условий возникновения и характеристик кавитации в главных циркуляционных насосах реакторов на быстрых нейтронах, охлаждаемых ТЖМТ: дисс. ... на соискание учёной степени канд. техн. наук / Боков П. А. – Н. Новгород, 2015. – 177 с.
 9. **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.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2012. – № 2. – С. 85–94.
 10. **Безносков, А.В.** Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике / А.В. Безносков, Т.А. Бокова; Нижегород. гос. техн. ун-т. Литера. – Н.Новгород, 2012. – 536 с.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2018*

A.V. Beznosov, T.A. Bokova, N.S. Lukichev, V.A. Gadetov, A.G. Meluzov

EXPERIMENTAL STUDIES ON DETERMINATION OF POWER LOSSES THROUGH FRICTION OF LEAD ON THE PUMP OF THE PUMP, AND GEOMETRY OF ITS FREE SURFACE WHILE ROTATING MOTION

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

Purpose: NSTU conducts experimental studies to determine the power losses during friction of the lead melt on the pump shaft, and the geometry of its free surface during rotational motion.

Design/methodology/approach: To substantiate the concept, the authors were invited to consider: the creation of the TVS-2015 stand for studying the characteristics of the friction of the pump shaft in the medium of the liquid medium, investigating the effect of friction of the pump shaft in three different media (water, air, liquid lead) for subsequent comparative analyzes, power associated with the frictional losses of the shaft of the circulating axial pump in the medium of TZHMT, obtaining and justifying the data showing the behavior of the free surface of the coolant during rotation of the imitator of the shaft pump, the geometric construction of the free surface of the coolant by a certain function, the creation of a database of calculated and theoretical characteristics confirmed by the experimental study of the influence of friction of the shaft on the power loss of the motor.

Findings: New solutions make it possible to increase the efficiency of the power unit due to the reduction of the mass-dimensions characteristics of the reactor circuit.

Research limitations/implications: The results of the studies of losses and tests of the free surface geometry showed significant differences in the characteristics obtained. The test data are fundamental for the improvement of axial circulation pumps for the installation of BREST OD 300.

Originality/value: The results of studies of power losses, as well as tests of the geometry of the free surface showed significant differences in the obtained characteristics on the water and lead coolant, as well as at different levels of filling. The data obtained showed a linear dependence at various rotational speeds of the pump shaft at a filling level of the coolant of 1500 mm. Revision of the experimental section showed minimal differences in the roughness of the imitation shaft surfaces before and after the experiments.

Key words: lead coolant, loss of power, efficiency of the unit, geometry of free surface, friction of lead coolant about the shaft.