

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ОСЕВЫХ НАСОСОВ ДЛЯ СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ОБОСНОВАНИЕ ГЛАВНЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ НАСОСОВ КОНТУРОВ РУ С ТЖМТ

А.В. Безносков, П.А. Боков, А.В. Львов, Т.А. Бокова, Н.С. Волков,

А.Р. Маров

*ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева»*

*603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, к. 1*



Приведены результаты исследований, направленных на обоснование проектных решений главных циркуляционных насосов контуров реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями. Показано существенное различие характеристик насосов, перекачивающих тяжелые жидкометаллические теплоносители. Подтверждено качественное различие кавитационных характеристик теплоносителей, состояние газов и паров в них, влияние устройств подвода и отвода, влияние характеристик профилей и геометрии лопаток рабочих колес и втулочного отношения на характеристики насосов. Исследования проводились на стендах НГТУ со свинцовым теплоносителем при его температуре 440 – 550 °С, расходе до 2000 т/ч. Внешний диаметр рабочих колес и выправляющих аппаратов составлял около 200 мм, толщина плоских лопаток из стали типа 08Х18Н10Т – 4,0 мм, профилированных до 6,0 мм. Скорость вращения вала насоса ступенчато изменялась через 100 об/мин от 600 до 1100 об/мин.

Исследования проводились с целью обоснования конструкторских, проектных решений насосов применительно к условиям установок малой и средней мощностей с реакторами на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем, прорабатываемых в НГТУ (БРС-ГПГ). Результаты экспериментов могут быть рекомендованы при проектировании других насосов, перекачивающих ТЖМТ.

**Ключевые слова:** реактор на быстрых нейтронах, главный циркуляционный насос, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, рабочие колеса, лопатки рабочего колеса, подвод и отвод насоса.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время отсутствует опыт проектирования и эксплуатации насосов, перекачивающих тяжелый жидкометаллический теплоноситель (Pb, эвтектика Pb-Bi) (ТЖМТ), применительно к реакторным установкам [1]. В НГТУ наряду с использованием тради-

© *А.В. Безносков, П.А. Боков, А.В. Львов, Т.А. Бокова, Н.С. Волков, А.Р. Маров, 2020*

ционных методов проектирования динамических насосов [2 – 6] выполняется комплекс экспериментальных исследований, направленных на определение специфики работы проточных частей осевых насосов в ТЖМТ [7], применительно к условиям контуров реакторных установок со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями [8 – 11].

На начальном этапе были исследованы и определены кавитационные характеристики ТЖМТ в рассматриваемых условиях. Независимыми методами было экспериментально подтверждено отсутствие в условиях реакторных контуров традиционной паровой кавитации. Определены условия её возникновения, развития и протекания [12]. Исследовано состояние и влияние газа и газопаровых смесей в ТЖМТ на работу проточных частей лопастных насосов [12]. Дальнейшие исследования проводились применительно к условиям РУ типа БРС ГПГ, прорабатываемой в НГТУ [13]. Были проведены экспериментальные исследования зависимостей характеристик осевых насосов (напора, подачи, КПД) от параметров элементов конструкций проточной части насоса. По результатам анализа полученных экспериментальных данных были выбраны параметры проточной части, при которых характеристики насосов (напор, подача, КПД) были максимальными из испытанных параметров, и изготовлены проточные части с такими параметрами рабочих колес с плоскими лопатками. Проведены экспериментальные исследования проточной части с улучшенными параметрами ее элементов. Проведено сравнение ее характеристик (напора, расхода, КПД) с характеристиками проточных частей с плоскими и профилированными лопатками рабочих колес насоса. На следующих этапах предполагается проведение ресурсных испытаний откорректированной улучшенной конструкции, затем профилирование геометрии лопаток рабочих колес и их испытания.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные исследования выполнялись применительно к условиям установок малой мощности с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемых свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями с горизонтальными парогенераторами (БРС-ГПГ), прорабатываемыми в НГТУ [13]. Эксперименты проводились на стендах НГТУ со свинцовым теплоносителем при температурах 440 – 550°C. Элементы проточной части, включая лопатки, рабочие колеса (плоские и профилированные) 4,0 – 6,0 мм выполнялись из стали типа 08Х18Н10Т. Внешний диаметр лопаток рабочих колес и выправляющих аппаратов (кроме особо оговоренных) составлял около 200 мм; диаметр втулки рабочего колеса 82 мм (рис. 1).

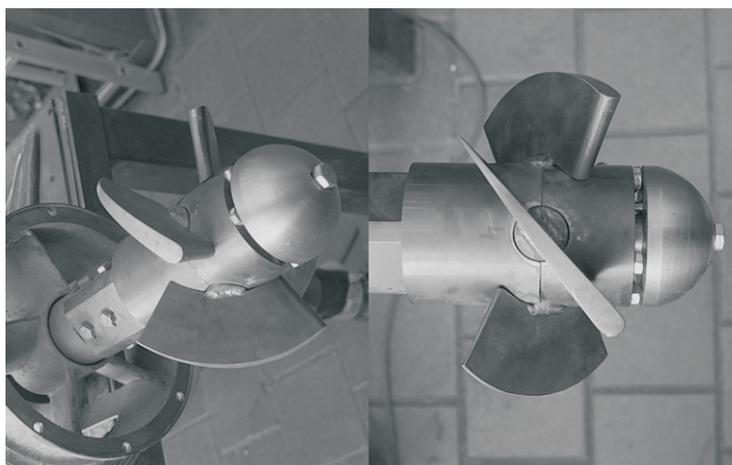


Рис. 1. Выемная часть насоса НСО-02 НГТУ

Скорость вращения вала насоса НСО-01 НГТУ с неподвижными лопатками (3 – 8 шт.)

на рабочем колесе и НСО-02 НГТУ с поворотными лопатками (4 шт.) изменялась ступенями по 100 об/мин в диапазоне от 600 до 1100 об/мин. Расход свинцового теплоносителя в циркуляционном контуре при полностью открытой регулирующей задвижке на трассе циркуляции при скорости вращения вала 1100 об/мин достигал 2000 т/ч.

На поверхностях конструкционных материалов проточной части насосов кроме особо оговоренных случаев (с формированием покрытий на основе бериллия и алюминия) формировались и поддерживались оксидные защитные покрытия системой регулирования кислорода в свинцовом теплоносителе стэндов, обеспечивающей поддержание в свинце термодинамически активного кислорода от  $10^{-5}$  до  $10^0$ .

На первом этапе суть последовательно проводимых исследовательских испытаний состояла в экспериментальном определении зависимостей характеристик осевого насоса стэнда (подача, напор, КПД) от варьируемых элементов конструкций проточной части, состав и геометрии которых оговаривались в программе-методике испытаний.

На первом этапе были проведены следующие эксперименты.

1. Экспериментальные исследования зависимостей характеристик насосов от параметров выправляющих аппаратов, устанавливаемых на выходе и входе потока в рабочие колеса [14, 15]. В трех вариантах модификации конструкций аппарата, устанавливаемых после рабочих колес, вход потока в межлопаточное пространство аппарата выполнялся с углами 22, 24, 28° с числом лопаток аппарата – пять штук. Результаты исследований вариантов конструкций выправляющих аппаратов на выходе и на входе в рабочие колеса показали, что подача насоса, как и его напор при прочих равных условиях, принципиально не изменяются. Результаты оказались неожиданными, существенно отличающимися от известных решений насосов, перекачивающих воду. Возможной причиной полученного результата может быть существенно большая степень реактивности проточной части насоса по сравнению с ожидаемой. Дополнительные испытания, проведенные при демонтированных выправляющих аппаратах, показали заметное улучшение характеристик насоса по сравнению с их наличием.

2. Экспериментальные исследования влияния закрутки потока на входе в рабочее колесо относительно направления вращения рабочего колеса насоса [14]. Исследования проводились со сменными участками, устанавливаемыми на входе в насос с углами поворота четырех лопаток  $-18^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $+18^\circ$ . Показано, что подача насоса консервативна по отношению к результатам испытаний. Напор насоса при всех вариантах устройств закрутки примерно одинаков и заметно уменьшается по сравнению с напором при демонтированных устройствах закрутки потока.

3. Экспериментальные исследования зависимостей характеристик насосов (напор, подача, КПД) от параметров решетки профилей рабочего колеса [16 – 18]. Исследовалось влияние основных параметров решетки профилей, которыми, согласно [2 – 6, 19], являются  $\alpha$  – угол установки лопатки в профиле;  $Z$  – число лопаток рабочего колеса;  $l/t$  – плотность решетки. При проведении исследований число лопаток, последовательно устанавливаемых на рабочие колеса, 3, 4, 6, 8; углы установки каждого набора лопаток – 9, 15, 22, 32, 38, 41, 46°. Переменная частота решеток (0,8 – 1,2) достигалась изменением длины хорды лопаток с изменением площади каждой лопатки. Исследования проводились при трех положениях клина регулирующей задвижки с соответствующим изменением гидравлического сопротивления трассы циркуляции теплоносителя. Зафиксирована существенная зависимость характеристик насоса от угла установки лопаток с наличием точек экстремума. В меньшей степени характеристики насоса зависят от числа лопаток и плотности решетки [15].

4. Экспериментальные исследования зависимостей характеристик насосов от геометрии отгиба входного участка лопатки решетки профилей [14]. В процессе исследований на вал насоса последовательно устанавливались три варианта конструкций рабо-

чего колеса с четырьмя плоскими (непрофилированными) лопатками из листа  $\delta = 4,0$  мм. Во всех конструкциях на передней по ходу потока одной трети хорды лопатки каждая лопатка была отогнута в сторону уменьшения угла установки лопаток: в варианте а) на  $\beta = 4^\circ$  ( $\alpha - 4^\circ$ ); в варианте б) на  $\beta = 8^\circ$  ( $\alpha - 8^\circ$ ); в варианте в) отгиб отсутствовал ( $\beta = 8^\circ$ ). Хорды лопаток оставались прямыми. Угол установки лопаток  $\alpha$  в рабочем колесе составлял 16, 20, 24 и  $28^\circ$  для каждого варианта отгиба лопаток ( $\beta = 4^\circ$ ,  $\beta = 8^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$ ); скорость вращения вала  $n = 600, 700, 800, 900, 1000, 1100$  об/мин. Эксперименты показали существенное изменение характеристик насоса в зависимости от угла отгиба передней трети хорды – при одной и той же установке лопаток, разница доходила до 20% [14]. Испытания позволили выбрать оптимальный вариант элемента конструкции для последующего этапа испытаний.

5. Экспериментальные исследования зависимостей характеристик насосов от геометрии выходного участка лопаток решеток профилей рабочих колес [15]. На вал насоса последовательно устанавливались рабочие колеса с лопатками с углами установки 16, 20,  $28^\circ$ . При каждом угле установки лопаток угол отгиба одной трети выходного участка лопаток составлял  $-8, -4, 0, +4, +8^\circ$  относительно прямой плоской лопатки. Эксперименты показали существенную зависимость характеристик насоса от угла отгиба одной трети выходного участка рабочих лопаток, причем расхождение достигало 15 – 20%. Испытания позволили выбрать оптимальный вариант элемента конструкции для последующего этапа испытаний.

6. Экспериментальные исследования зависимостей характеристик насосов от втулочного отношения рабочего колеса. В процессе экспериментов исследовались характеристики насосов с наружным диаметром лопаток рабочего колеса  $\varnothing 213$  мм и четырьмя втулками с диаметрами  $\varnothing 82, \varnothing 96,5, \varnothing 109, \varnothing 120$  мм с плоскими лопатками ( $\delta = 4,0$  мм) рабочего колеса. Зафиксировано плавное незначительное уменьшение характеристик насоса с увеличением диаметра втулки [14], что несколько расходится с литературными рекомендациями.

На следующем этапе исследований был проведен сравнительный анализ полученных результатов. По результатам анализа были выбраны элементы проточной части, при которых характеристики насосов (напор, подача, КПД) были максимальными, и изготовлены проточные части с такими параметрами с рабочими колесами с плоскими лопатками. Результаты испытаний оптимизированного варианта проточной части насоса показали следующее.

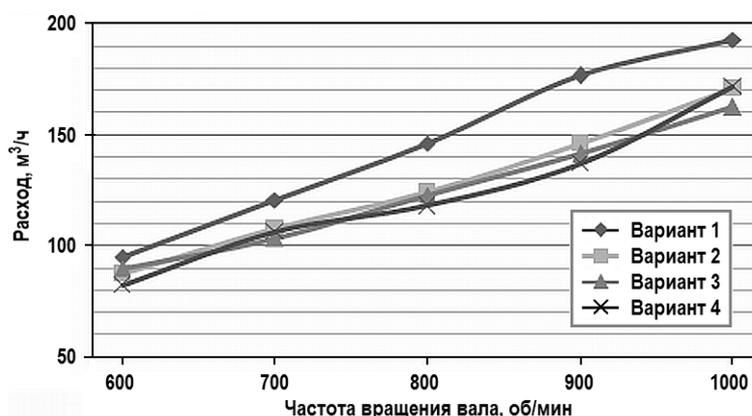


Рис. 2. Зависимость подачи насосом свинцового теплоносителя от скорости вращения,  $T = 450^\circ\text{C}$

Вариант конструкции проточной части с оптимизированными элементами по результатам испытаний первого этапа [14] имеет заметно лучшие характеристики насоса по сравнению со всеми вариантами, испытанными ранее, в том числе (рис. 2, 3, 4)

а) с вариантами конструкции с плоскими лопатками с углом установки плоских лопаток  $\alpha = 20^\circ$ , углом отгиба лопаток на входе  $4^\circ$ , углом отгиба на выходе  $0^\circ$  (кривая 2);

б) с вариантом конструкции с плоскими лопатками с углом установки плоских лопаток  $\alpha = 20^\circ$ , углом отгиба на входе  $0^\circ$ , углом отгиба на выходе  $8^\circ$  (кривая 3);

в) с оптимальным из испытанных ранее вариантов лопастной системы с защитными покрытиями на основе алюминия с профилированными лопатками (кривая 4).

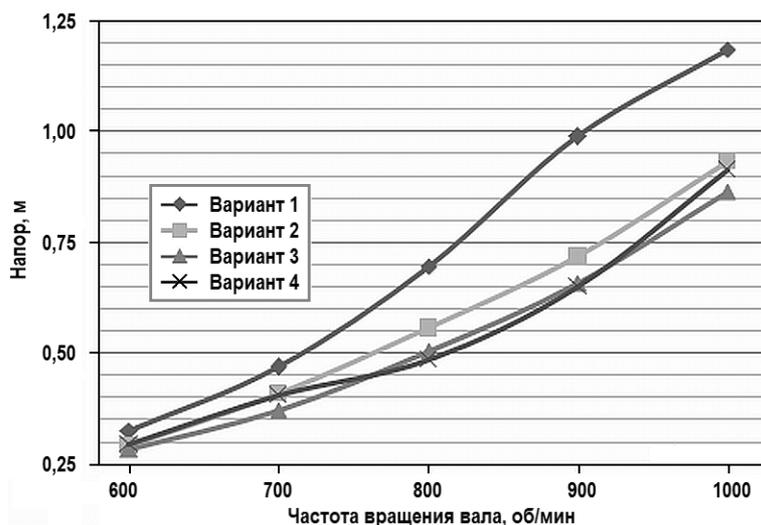


Рис. 3. Зависимость напора насоса от скорости вращения вала,  $T = 450^\circ\text{C}$

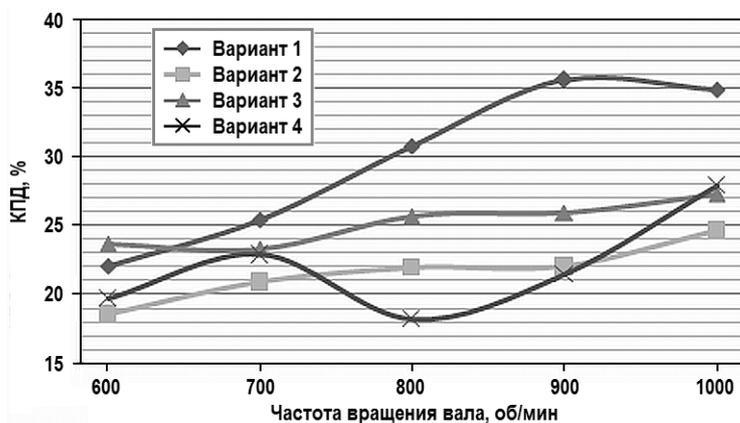
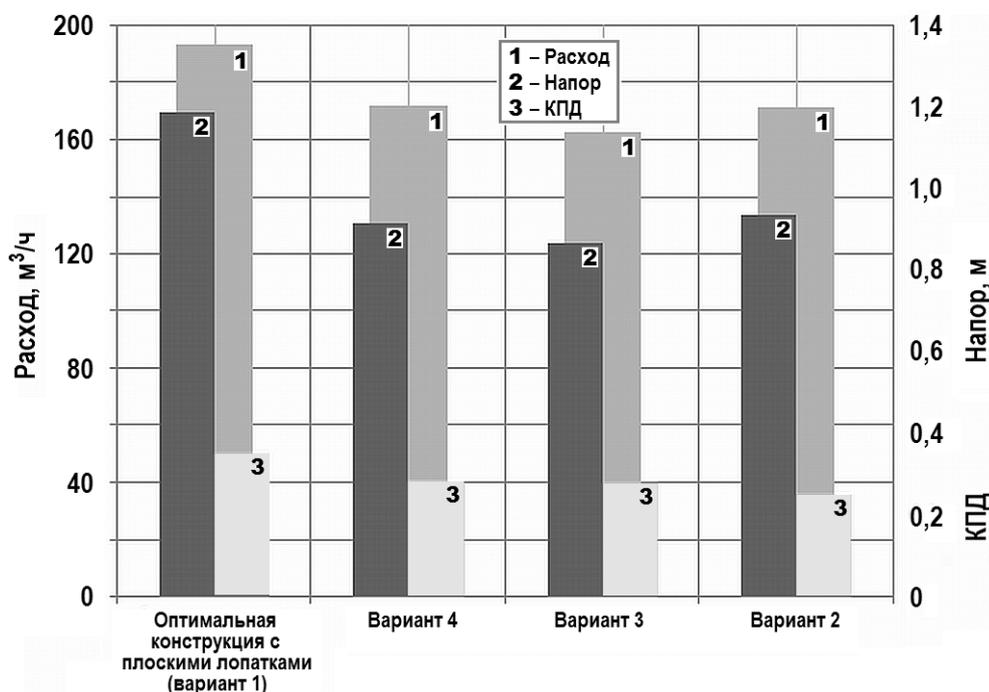


Рис. 4. Зависимость КПД насоса от скорости вращения вала,  $T = 450^\circ\text{C}$

Превышение по подаче насоса оптимизированной конструкции составило 10 – 15% (рис. 2) при скорости вращения вала насоса 1000 об/мин. Превышение по напору насоса оптимизированной проточной частью составило 20 – 25% (см. рис. 3) при скорости вращения вала насоса 1000 об/мин. У оптимизированной проточной части КПД также больше во всех диапазонах испытаний (см. рис. 4). Обобщенные характеристики (рис. 5) показывают безусловные преимущества конструкции с оптимизированными элементами проточной части с плоскими лопатками по сравнению с ранее испытанными вариантами конструкций, имеющих лучшие характеристики.

Рис. 5. Характеристики вариантов проточной части насосов ( $T = 450^{\circ}\text{C}$ ,  $n = 1000$  об/мин)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные данные учитывают специфику воздействия ТЖМТ на элементы проточной части насоса и рекомендуются для использования при обосновании проектных решений главных циркуляционных насосов в РУ с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями.

## Литература

1. Безносов А.В., Драгунов Ю.Г., Рачков В.И. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике. – Нижний Новгород: НГТУ, 2006. – 435 с.
2. Карелин В.Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. – М.: Машиностроение, 1975. – 336 с.
3. Ломакин А.А. Центробежные и осевые насосы. – М.-Л.: Машиностроение, 1966. – 364 с.
4. Будов В.М. Насосы АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 408 с.
5. Михайлов А.К., Малюшенко В.В. Лопастные насосы. Теория, расчет и конструирование. – М.: Машиностроение, 1977. – 288 с.
6. Рождественский В.В. Кавитация. – Л.: Судостроение, 1977. – 247 с.
7. Четкин А.В. Высокотемпературные теплоносители. – М.: Энергия, 1971. – 496 с.
8. Безносов А.В., Бокова Т.А. Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике. – Нижний Новгород: НГТУ, 2012. – 536 с.
9. Безносов А.В., Боков П.А., Бокова Т.А. Технологии и основное оборудование контуров реакторных установок, промышленных и исследовательских стендов со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. – Нижний Новгород: НГТУ, 2016. – 488 с.
10. Безносов А.В., Антоненков М.А., Боков П.А., Баранова В.С., Кустов М.С. Специфика циркуляционных насосов реакторных контуров со свинцовым и свинцово-висмутовыми теплоносителями. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 4. – С. 155-160.
11. Драгунов Ю.Г., Лемехов В.В., Моисеев А.В., Смирнов В.С. Реактор на быстрых нейтро-

нах со свинцовым теплоносителем (БРЕСТ). // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2015. – № 3. – С. 97-103.

12. *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. – Н. Новгород: НГТУ, 2015. – 177 с.

13. *Безносков А. В. и др.* Специфические решения реакторного контура установок БРС-ГПГ малой и средней мощности со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями. // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2018 г. – Вып. 2. – с. 28-34.

14. *Безносков А. В. и др.* Экспериментальные исследования зависимостей характеристик осевых насосов, перекачивающих свинцовый теплоноситель, от параметров выправляющего аппарата. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 164-173.

15. *Безносков А. В. и др.* Экспериментальные исследования зависимостей характеристик осевых насосов, перекачивающих свинцовый теплоноситель, от геометрии выходного участка лопаток решеток профилей рабочего колеса. // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2019. – № 1 (124).

16. *Безносков А. В. и др.* Экспериментальные исследования зависимостей характеристик осевых насосов, перекачивающих свинцовый теплоноситель, от параметров решеток профилей рабочих колес. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – № 1. – С. 138-146.

17. *Безносков А. В., Боков П. А., Зудин А. Д., Львов А. В., Бокова Т. А., Трушков Н. В.* Гидродинамика и работоспособность моделей ГЦН БРЕСТ-ОД-300 в свинцовом теплоносителе на стенде ФТ-4 НГТУ. // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2014. – № 55. – С. 370.

18. *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. 38-45.

19. *Папир А. Н.* Водометные движители малых судов / *А. Н. Папир.* – Л.: Издательство «Судостроение», 1970. – 256 с.

Поступила в редакцию 25.09.2019 г.

#### Авторы

Безносков Александр Викторович, профессор  
E-mail: beznosov@nnov.ru

Боков Павел Андреевич, доцент  
E-mail: bokow\_pavel@mail.ru

Львов Александр Вячеславович, инженер  
E-mail: knyaz\_lvov@mail.ru

Бокова Татьяна Александровна, доцент  
E-mail: tatabo@bk.ru

Волков Никита Сергеевич, аспирант  
E-mail: hortmetall@yandex.ru

Маров Александр Романович, магистр  
E-mail: marov\_2011@mail.ru

UDC 621.039

## **EXPERIMENTAL STUDIES INTO THE PERFORMANCE OF THE LEAD COOLANT AXIAL PUMP WET ENDS TO JUSTIFY MAIN CIRCULATION PUMPS FOR THE HLMC REACTOR PLANT CIRCUITS**

Beznosov A.V., Bokov P.A., L'vov A.V., Bokova T.A., Volkov N.S., Marov A.P.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
24 Minina Str., Nizhny Novgorod, 603950 Russia

### ABSTRACT

The paper presents the results of the studies to justify the design solutions for the main circulation pumps of the heavy liquid metal cooled reactor plant circuits. A substantial difference has been shown in the performance of pumps for the heavy liquid metal coolant transfer. The studies have confirmed the qualitative difference in the cavitation performance of coolants, the state of the gases and vapors they contain, the influence of supply and discharge devices, and the influence of the impeller blade profile performance and geometry and the hub-tip ratio on the pump performance. The studies were performed based on NNSTU's lead-cooled test facilities with the coolant temperature in a range of 440 to 550°C and the coolant flow rate of up to 2000 t/h. The outer diameter of the impellers and the straightening apparatuses was about 200 mm, and the thickness of the straight 08Kh18N10T steel blades was 4.0 mm and that of the profile blades was up to 6.0 mm. The pump shaft speed changed in a stepped manner from 600 rev/min to 1100 rev/min after each 100 rev/min.

The studies were conducted to justify the engineering and design solutions for pumps as applied to conditions of small and medium plants with fast neutron lead cooled reactors currently under investigation at NNSTU (BRS-GPG). The experimental results can be recommended for use to design other HLMC transferring pumps.

**Key words:** fast neutron reactor, main circulation pump, heavy liquid metal coolant, impellers, impeller blades, pump feed and discharge.

### REFERENCES

1. Beznosov A.V., Dragunov Ju.G., Rachkov V.I. *Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Energy*. Nizhny Novgorod. NGTU Publ., 2006. 435 p. (in Russian).
2. Karelin V.Ya. *Cavitation Phenomena in Centrifugal and Axial Pumps*. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1975. 336 p. (in Russian).
3. Lomakin A.A. *Centrifugal and Axial Pumps*. Moscow-Leningrad. Mashinostroenie Publ., 1966. 364 p. (in Russian).
4. Budov V.M. *Pumps of Nuclear Power Plants*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1986. 408 p. (in Russian).
5. Mihajlov A.K., Maljushenko V.V. *Paddle Pumps. Theory, Calculation and Design*. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1977. 288 p. (in Russian).
6. Rozhdestvenskij V.V. *Cavitation*. Leningrad. Sudostroenie Publ., 1977. 247 p. (in Russian).
7. Chechyotkin A.V. *High Temperature Coolants*. Moscow. Energia Publ., 1971. 496 p. (in Russian).
8. Beznosov A.V., Bokova T.A. *Equipment of Power Circuits with Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Power Engineering*. Nizhny Novgorod. NGTU Publ., 2012. 536 p. (in Russian).
9. Beznosov A.V., Bokov P.A., Bokova T.A. *Technologies and the Basic Equipment of Circuits of Reactor Installations, Industrial and Research Stands with Lead and Lead-Bismuth Coolants*. Nizhny Novgorod. NGTU Publ., 2016. 488 p. (in Russian).
10. Beznosov A.V., Antonenkov M.A., Bokov P.A., Baranova V.S., Kustov M.S. Specificity of

circulating pumps of reactor circuits with lead and leadbismuth coolants. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2009, no. 4, pp. 155-160 (in Russian).

11. Dragunov Yu.G., Lemekhov V.V., Moiseev A.V., Smirnov V.S. Fast neutron reactor with lead coolant (BREST). *Problemy Mashinostroeniya i Avtomatizacii*. 2015, no. 3, pp. 97-103 (in Russian).

12. Bokov P. A. *Investigation of the conditions for the occurrence and characteristics of cavitation in fast neutrons cooling heavy liquid metal coolant*. Cand. tech. sci. diss. Nizhny Novgorod, NGTU Publ., 2015, 177 p. (in Russian).

13. Beznosov A.V., T.A. Bokova, P.A. Bokov, N.S. Volkov, A.A. Karbyshev. Specific solutions of the reactor circuit of the BRS-GPG low and medium power plants with lead and lead-bismuth coolants. *VANT. Ser.: Fizika Yadernykh Reaktorov*. 2018, iss. 2, pp. 28-34 (in Russian).

14. A.V. Beznosov, A.V. Lvov, T.A. Bokova, P.A. Bokov, N.S. Lukichev. Experimental studies of the dependence of the characteristics of axial pumps pumping lead coolant on the parameters of the straightening apparatus. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019, no. 2, pp. 138-146 (in Russian).

15. Beznosov, A.V. Lvov, N.S. Volkov, N.S. Lukichev, K.V. Menskaya, P.A. Bokov, T.A. Bokova, E.G. Novinsky, A.R. Marov. Experimental studies of the dependences of axial pumps pumping a lead heat carrier from the geometry of the exit plot of the blades of the work profiles of the worker wheel profiles. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2019, no. 1 (124), pp. 76-82 (in Russian).

16. Beznosov A.V., Lvov A.V., Bokov P.A., Bokova P.A., Razin V.A. Experimental studies of the dependencies of the characteristics of axial pumps, pumped lead coolant, on the parameters of grids of profiles of impellers. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2017, no. 1, pp. 138-144 (in Russian).

17. Beznosov A.V., Bokov P.A., Zudin A.D., Lvov A.V., Bokova T.A., Trushkov N.V. Hydrodynamics and efficiency of models of MCP BREST-OD-300 in a lead coolant at the FT-4 stand of the NNSTU. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2014, no. S5, p. 370 (in Russian).

18. Beznosov A.V., Drozdov Yu.N., Antonenkov M.A., Bokova T.A., L'vov A.V., Lemekhov V.V. Experimental study of the flowing part of the model of the axial main circulation pump of a reactor installation with a heavy liquid metal coolant. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2014, no. 2, pp. 38-45 (in Russian).

19. Papyr A.N. *Water-Jet Propulsion of Small Vessels*. Leningrad. Sudostroenie Publ., 1970, 256 p. (in Russian).

### Authors

Beznosov Aleksandr Viktorovich, Professor

E-mail: beznosov@nnov.ru

Bokov Pavel Andreevich, Assistant Professor

E-mail: bokov\_pavel@mail.ru

L'vov Aleksandr Vyacheslavovich, Engineer

E-mail: knyaz\_lvov@mail.ru

Bokova Tatiana Aleksandrovna, Assistant Professor

E-mail: tatabo@bk.ru

Volkov Nikita Sergeevich, PhD Student

E-mail: hortmetall@yandex.ru

Маров Aleksandr Romanovich, Master Student

E-mail: marov\_2011@mail.ru