

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК ОСЕВЫХ НАСОСОВ, ПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СВИНЦОВЫЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ, ОТ ПАРАМЕТРОВ ВЫПРАВЛЯЮЩЕГО АППАРАТА

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

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24*



Представлены результаты экспериментальных зависимостей характеристик осевого насоса (расхода, напора, КПД) в свинцовом теплоносителе от параметров устанавливаемого по ходу потока после рабочего колеса выправляющего аппарата (ВА) – угла входа потока в ВА и числа лопаток ВА при варьируемом изменении скорости вращения рабочего колеса.

Исследования выполнялись применительно к условиям работы установок малой и средней мощности с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемых свинцовым теплоносителем, с горизонтальными парогенераторами (БРС ППГ). Технические решения таких установок прорабатываются в Нижегородском государственном техническом университете (НГТУ).

Эксперименты проводились на стенде ФТ-4 НГТУ при температурах свинцового теплоносителя 440 – 500°C. Число профилированных лопаток в ВА – 22, 24, 28 и 32°. Испытания выполнялись и при отсутствующем (демонтированном) ВА. Скорость вращения вала насоса НСО-01 НГТУ, в выемную часть которого устанавливались сменные ВА, изменялась с шагом 100 об./мин от 600 до 1100 об./мин. Диаметр втулки ВА – 82 мм, диаметр лопаток ВА – 213 мм, высота – 80 мм, максимальный расход свинцового теплоносителя при исследованиях достигал ~ 1650 т/ч. Определялись характеристики насоса НСО-01 НГТУ при четырех сменных выправляющих аппаратах, а также при отсутствии ВА, со скоростями вращения вала насоса от 600 до 1100 об./мин, при изменении гидравлического сопротивления циркуляционного контура за счет перемещения клина установленной в нем задвижки. Испытания выполнялись с рабочим колесом конструкции и поставки НГТУ ( $D = 213$  мм,  $d_{\text{вр}} = 82$  мм, число лопаток – четыре, угол установки лопастей – 28°).

Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании осевых насосов, перекачивающих ТЖМТ.

**Ключевые слова:** тяжелый жидкометаллический теплоноситель, реактор на быстрых нейтронах, свинцовый теплоноситель, осевой насос, напор насоса, расход насоса, колесо насоса.

### ВЕДЕНИЕ

В настоящее время отсутствует опыт создания и эксплуатации осевых насосов для проектирования установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ)

© А.В. Безносков, А.В. Львов, П.А. Боков, Т.А. Бокова, Н.С. Лукичев, 2019

[1]. Типовая конструктивная схема осевого насоса включает в себя выправляющий аппарат, предназначенный для преобразования части скорости потока, выходящего из рабочего колеса в его напор, и стабилизации характеристик потока. Выправляющий аппарат (ВА) с невращающимися лопатками устанавливается по ходу потока после вращающегося рабочего колеса насоса. Эффективность работы ВА зависит как от его геометрии (числа лопаток, угла входа потока, профиля лопаток и т.д.), так и от характеристик силового взаимодействия пристенного слоя теплоносителя и контактирующего с ним материала лопаток (смачиваемости, работы адгезии, шероховатости и т.д.) [2 – 7].

Экспериментально определенные зависимости характеристик осевых насосов от конструктивных параметров выправляющих аппаратов в свинцовом теплоносителе при условиях реакторных контуров позволяют обоснованно проектировать оптимальную геометрию проточных частей насоса в заданных диапазонах скоростей вращения вала.

На предыдущих этапах работ, проводимых в НГТУ на стенде ФТ-4 НГТУ [8 – 14], были обоснованы методы экспериментов, направленных на разработку рекомендаций по проектным решениям главного циркуляционного контура насоса применительно к РУ с реакторами на быстрых нейтронах малой и средней мощности, охлаждаемым свинцовым теплоносителем с горизонтальными парогенераторами (БРС ГПГ); технические решения таких РУ прорабатываются в НГТУ [15 – 23].

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Суть исследований состояла в определении характеристик осевого насоса (расхода, напора, КПД), установленного в циркуляционном контуре со свинцовым теплоносителем при различных конструкциях ВА, отличающихся числом лопаток и углами входа потока в ВА при ступенчатом изменении скорости вращения вала насоса при фиксированной геометрии рабочего колеса.



Рис. 1. Варианты конструкций выправляющего аппарата

Вариант ВА (рис. 1) устанавливается в выемную часть циркуляционного насоса НСО-01 контура свинцового теплоносителя стенда ФТ-4. Температура свинцового теплоносителя при испытаниях составляла 440 – 500°C.

Характеристики насоса определялись при каждом установленном в выемную часть насоса варианте конструкции ВА в диапазоне скорости вращения вала насоса от 600 до 1100 об./мин ступенями по 100 об./мин. Гидравлическое сопротивление контура циркуляции свинцового теплоносителя изменялось путем изменения клина регулирующей задвижки. Максимальный расход свинцового теплоносителя в про-

цессе испытаний достигал 1650 т/ч.

Все элементы конструкции ВА изготавливались из стали 12Х18Н10Т. У всех вариантов конструкций диаметр втулки выправляющего аппарата составлял 82 мм, максимальный диаметр описанной лопатками окружности по ходу потока – 213 мм.

Угол выхода абсолютной составляющей скорости потока на выходе из рабочего колеса при номинальном режиме, определенный путем предварительных расчетных оценок, находился в области 26 – 28°. Для проведения испытаний были изготовлены варианты конструкций ВА с лопатками, обеспечивающими вход потока в межлопаточное пространство с углами 22, 24 и 28° (восемь лопаток) и 32° (пять лопаток). Также было изготовлено устройство (проставка, состоящая из обечайки и фланцев) – камера, замещающая выправляющий аппарат, но не имеющая в своем составе лопастей.

На поверхностях лопаток и других элементов выправляющих аппаратов формировались и поддерживались оксидные защитные покрытия посредством контролируемого регулирования термодинамической активности кислорода  $a$  в свинце. Этот безразмерный параметр поддерживался в диапазоне  $a \in [1 \cdot 10^{-4}, 1 \cdot 10^{-3}]$  штатной системой регулирования стенда ФТ-4 путем захвата и ввода в поток теплоносителя пузырей газообразной смеси аргона с водородом или с кислородом струями свинца, падающими на свободную поверхность [15] из трубы постоянного напора циркуляционного насоса стенда. Точность регулирования в указанном диапазоне обеспечивалась характеристиками датчика термодинамической активности кислорода в свинце конструкции и поставки ГЦН РФ-ФЭИ, имеющего пределы допускаемого относительного отклонения ЭДС от номинального 10%. В каждом режиме измерялись и фиксировались следующие параметры стенда:

- скорость вращения вала насоса НСО-01;
- давление теплоносителя на входе и выходе из насоса;
- расход теплоносителя в циркуляционном контуре;
- температура перекачиваемого свинцового теплоносителя;
- мощность электродвигателя насоса;
- крутящий момент на валу насоса;
- термодинамическая активность кислорода в свинцовом теплоносителе.

Исследования проводились во всех режимах при фиксированных положениях клина регулирующей задвижки в циркуляционном контуре (поднят полностью, опущен на 30% по высоте, опущен на 60% по высоте, опущен на 90% по высоте) с соответствующим изменением гидравлического сопротивления трассы циркуляции.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Определена зависимость расхода и напора насоса от угла входа потока в ВА и числа лопаток. Результаты замеров расхода насоса при последовательно устанавливаемых выправляющих аппаратах с углами входа потока 22, 24, 28, 32° и с демонтированным ВА показали (рис. 2), что расход насоса при фиксированной скорости вращения вала практически не изменяется, т.е. расход насоса консервативен к испытанным вариантам конструкций выправляющих аппаратов.

Уменьшение числа лопаток ВА привело к некоторому увеличению расхода насоса. Такой результат может быть объяснен тем, что сокращение числа лопаток уменьшило гидравлические потери в ВА. При испытаниях варианта проточной части насоса без ВА было зафиксировано некоторое увеличение расхода насоса по сравнению с восьмилопатными аппаратами. Следует отметить, что в конструкции с пятью лопатками угол входа потока был больше (32°) и профиль лопаток несколько отличался от других вариантов конструкций.

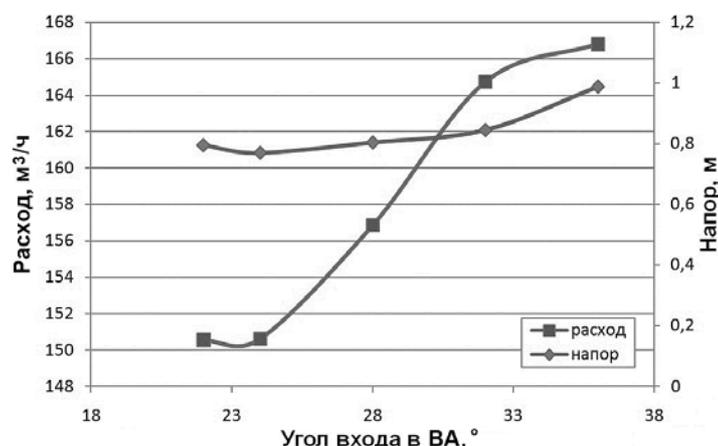


Рис. 2. Зависимость напора и расхода от угла входа в ВА при неизменной скорости вращения вала насоса  $n = 1000$  об./мин

Напор насоса при фиксированных скоростях вращения вала и углах входа потока в ВА 22, 24 и 28° изменяется незначительно (в пределах нескольких процентов) и несколько более значительно при значении этого угла 32°, что может быть объяснено большим, чем у предыдущих различием в конструкциях. Ожидалось существенно большее расхождение результатов испытаний при различных конструкциях выпрямляющих аппаратов. Такие результаты зафиксированы при испытаниях всех вариантов конструкций при всех скоростях вращения вала насоса от 600 до 1100 об./мин. Возможной причиной полученных результатов является наличие в проточной части насоса какого-то фактора, который является определяющим (кроме скорости вращения вала) и нивелирует возможные различия напора при испытаниях вариантов конструкций. Менее вероятно то, что испытания проводились при существенно неоптимальных значениях углов входа потока в ВА. При удалении из конструкции исследуемой проточной части ВА наблюдалось стабильное улучшение характеристик насоса во всем исследуемом диапазоне (табл. 1). Этот результат противоречит литературным данным об осевых насосах, перекачивающих воду [2]. Возможным объяснением этого результата является наличие в конструкции отвода насоса трубы постоянного напора, различие в физических характеристиках перекачиваемых сред и их взаимодействие с поверхностями конструкций.

Таблица 1

**Характеристики насоса при  $n = 1000$  об./мин**

Угол, °	Напор, м ст.свинца	Расход, т/ч	КПД, %
22	0,795	150,5709	16,34
24	0,771	150,6349	15,89
28	0,804	156,882	17,00
32	0,845	164,7588	17,63
Выпрямляющий аппарат отсутствует	0,988	166,8293	22,78

**ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК НАСОСА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ВЫПРАВЛЯЮЩИХ АППАРАТОВ В НАСОСЕ**

Характер зависимости расхода насоса от скорости вращения вала (рис. 3) одинаков для всех испытанных вариантов конструкций выпрямляющих аппаратов насоса, начиная с  $n = 700$  об./мин.

Существенное отличие характеристик зависимости при  $n = 600$  об./мин определяется конструкцией насоса НСО-01 НГТУ, имеющего отверстия в нижней части трубы постоянного напора.

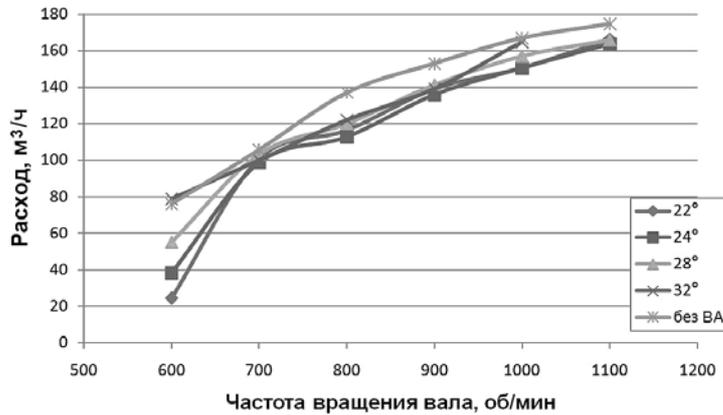


Рис. 3. Зависимость расхода от скорости вращения вала насоса при различных конструкциях ВА

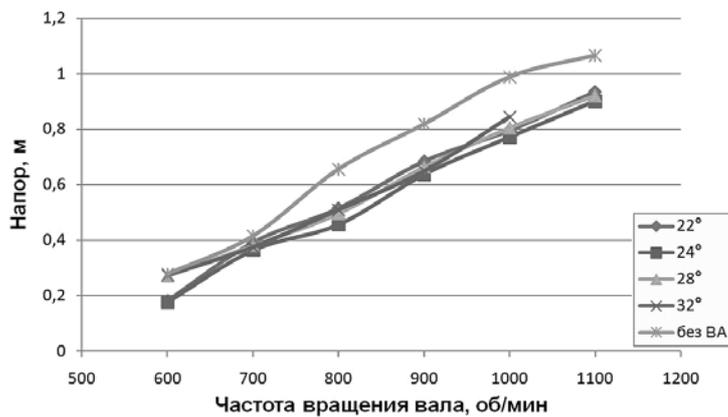


Рис. 4. Зависимость напора насоса от скорости вращения вала при различных конструкциях ВА

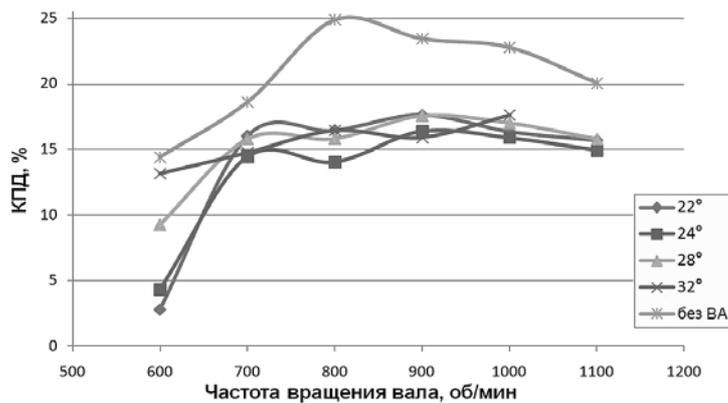


Рис. 5. Зависимость КПД насоса от скорости вращения вала при различных конструкциях ВА

Характер зависимости напора насоса от скорости вращения вала (рис. 4) одинаков для всех испытанных вариантов конструкций выправляющих аппаратов насоса в диапазоне от 600 до 1100 об./мин. Такой результат требует проведения дополнительных исследований для определения оптимальной конструкции ВА насоса.

Характер зависимостей КПД насоса от скорости вращения вала (рис. 5) практически одинаков для всех испытанных вариантов конструкций ВА насоса в диапазоне от 700 до 1100 об./мин. Фиксируется некоторое возрастание КПД, начиная со скорости  $n = 700$  об./мин до  $\sim 900$  об./мин с последующим снижением на  $\sim 10\%$ . Относительно низкий КПД при испытаниях моделей насоса (примерно до 18%) можно объяснить масштабным и другими факторами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментальных исследований зависимостей характеристик осевых насосов (напора, расхода, КПД), перекачивающих свинцовый теплоноситель при температуре 440 – 500°C с максимальным расходом до 1650 т/ч, от параметров выправляющих аппаратов насоса с пятью и восемью лопатками, углом входа потока в выправляющий аппарат 22, 24, 28 и 32° в диапазоне скоростей вращения вала от 600 до 1100 об./мин рекомендуется использовать при проектировании осевых насосов РУ с ТЖМТ. Особое внимание должно быть обращено на экспериментальную проверку необходимости установки и конструкции выходного выправляющего аппарата.

## Литература

1. Безносков А.В., Драгунов Ю.Г., Рачков В.И. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике. – Нижний Новгород: НГТУ, 2006. – 435 с.
2. Пфлейдерер К. Лопаточные машины для жидкости и газа. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1960. – 685 с.
3. Карелин В.Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. – М.: Машиностроение, 1975. – 336 с.
4. Ломакин А.А. Центробежные и осевые насосы. – М.-Л.: Машиностроение, 1966. – 364 с.
5. Будов В.М. Насосы АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 408 с.
6. Михайлов А.К., Малюшенко В.В. Лопастные насосы. Теория, расчет и конструирование. – М.: Машиностроение, 1977. – 288 с.
7. Рождественский В.В. Кавитация. – Л.: Судостроение, 1977. – 247 с.
8. Безносков А.В., Львов А.В., Боков П.А., Бокова П.А., Шихов Д.В. Экспериментальные исследования и отработка характеристик насосов на свинцовом теплоносителе. // Известия вузов. Ядерная энергетика – 2015. – № 4. – С. 123-132.
9. Безносков А.В., Львов А.В., Боков П.А., Бокова П.А., Разин В.А. Экспериментальные исследования зависимостей характеристик осевых насосов, перекачиваемых свинцовый теплоноситель, от параметров решеток профилей рабочих колес. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – № 1. – С. 138-144.
10. 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. – 2015. – № 1. – С. 125-133.
11. Безносков А.В., Бокова Т.А., Зудин А.Д., Козлов А.А., Мелузов А.Г., Новожилова О.О. Экспериментальное исследование и отработка насосов для перекачки свинцового и свинец-висмутового теплоносителя для ядерных установок // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – № 1. – С. 117-128.
12. 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. – № 5. – С. 370.
13. 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.
14. 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.

15. *Безносков 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.
16. *Безносков А.В., Бокова Т.А.* Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике. – Нижний Новгород: НГТУ, 2012. – 536 с.
17. Справочник по теплогидравлическим расчетам. / Под ред. Б.С. Петухова. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 360 с.
18. *Безносков А.В., Антоненков М.А., Бокова Т.А., Лемехов В.В., Львов А.В.* Особенности характеристик проточной части модели осевого насоса на высокотемпературном свинцовом теплоносителе. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 4 (101). – С. 206-213.
19. *Безносков А.В., Львов А.В., Боков П.А., Лемехов В.В., Ларькина Ю.А.* Ядерная энергетическая установка. – Патент на полезную модель RUS 123183 25.06.2012.
20. *Дроздов Ю.Н., Безносков А.В., Макаров В.В., Пучков В.Н., Антоненков М.А., Кузнецов Д.В.* Исследование узлов трения ядерных установок, работающих в среде тяжелых высокотемпературных жидкометаллических теплоносителей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2009. – № 3-1 (19). – С. 128-136.
21. *Безносков 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.
22. *Драгунов Ю.Г., Лемехов В.В., Моисеев А.В., Смирнов В.С.* Реактор на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем (БРЕСТ). // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2015. – № 3. – С. 97-103.
23. *Чечеткин А.В.* Высокотемпературные теплоносители. – М.: Энергия, 1971. – 496 с.

Поступила в редакцию 11.09.2018 г.

#### **Авторы**

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

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

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

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

Лукичев Никита Сергеевич, магистрант  
E-mail: nikitlukichev@mail.ru

## EXPERIMENTAL STUDIES INTO THE DEPENDENCES OF THE AXIAL LEAD COOLANT CIRCULATION PUMP PERFORMANCE ON THE PUMP STRAIGHTENING DEVICE PARAMETERS

Beznosov A.V., Lvov A.V., Bokova T.A., Bokov P.A., Lukichev N.S.

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

### ABSTRACT

The paper presents the results of experimental studies into the dependences of the axial pump performance (delivery rate, head, efficiency) in lead coolant on the parameters of the straightening device (SD) installed downstream of the impeller (the SD inlet flow angle and the number of the SD blades with a variable impeller speed change).

The studies were performed as applied to the operating conditions of small and medium plants with lead cooled fast neutron reactors with horizontal steam generators (BRS GPG). The designs of such plants are being matured at Nizhny Novgorod State Technical University (NNSTU).

The experiments were conducted on the NNSTU FT-4 test bench at the lead coolant temperatures in a range of 440 to 500 °C. The number of the test blades was five and eight, and the SD inlet flow angle was 22, 24, 28, and 32°. The tests were also performed with no SD (with the dismantled SD). The shaft speed of the NNSTU NSO-01 pump, with changeable SDs installed into its rotating assembly, was varied in a range of 600 to 1100 rev/min with a step of 100 rev/min. The SD sleeve diameter was 82 mm, the SD blade diameter and height were 213 mm and 80 mm respectively, and the maximum lead coolant flow rate during the studies was up to ~ 1650 t/h. The NNSTU NSO-01 pump performance was determined with four changeable straightening devices and with no SD, the pump shaft speed being 600 to 1100 rev/min, as the circulation circuit hydraulic resistance changed owing to the movement of the wedge in the valve installed in it. The tests were performed with the impeller designed and supplied by NNSTU ( $D = 213$  mm,  $d_{sl} = 82$  mm, the blade number is four, and the blade angle is 28°).

The obtained results are recommended to be used to design axial heavy liquid metal coolant pumps.

**Key words:** heavy liquid metal coolant, fast neutron reactor, lead coolant, axial pump, pump head, pump delivery rate, pump impeller.

### REFERENCES

1. Beznosov A.V., Dragunov Yu.G., Rachkov V.I. *Heavy Liquid-Metal Coolants in Nuclear Power Engineering*. Nizhny Novgorod. NGTU Publ., 2006, 435 p. (in Russian).
2. Pfljederer K. *Paddle Machines for Liquid and Gas*. Moscow. Gosudarstvennoe Nauchno-tekhnicheskoe Izdatel'stvo Mashinostroitel'noy Literatury Publ., 1960, 685 p. (in Russian).
3. Karelin V.Ya. *Cavitation Phenomena in Centrifugal and Axial Pumps*. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1975, 336 p. (in Russian).
4. Lomakin A.A. *Centrifugal and Axial Pumps*. Moscow-Leningrad. Mashinostroenie

Publ., 1966, 364 p. (in Russian).

5. Budov V.M. *Pumps of Nuclear Power Plants*. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1986, 408 p. (in Russian).

6. Mihajlov A.K., Maljushenko V.V. *Paddle Pumps. Theory, Calculation and Design*. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1977, 288 p. (in Russian).

7. Rozhdestvenskij V.V. *Cavitation*. Leningrad. Sudostroenie Publ., 1977, 247 p. (in Russian).

8. Beznosov A.V., Lvov A.V., Bokov P.A., Bokova P.A., Shihov D.V. Experimental research and development of the characteristics of pumps on a lead coolant. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*, 2015, no. 4, pp. 123-132 (in Russian).

9. 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).

10. 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 NSTU. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2015, no. 1, pp. 125-133 (in Russian).

11. Beznosov A.V., Bokova T.A., Zudin A.D., Kozlov A.A., Meluzov A.G., Novozhilova O.O. Experimental research and development of pumps for pumping lead and lead-bismuth coolant for nuclear installations. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2017, no. 1, pp. 117-128 (in Russian).

12. 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 NSTU. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2014, no. S5, p. 370 (in Russian).

13. 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).

14. Beznosov A.V., Drozdov Yu.N., Antonenkov M.A., Bokova T.A., Lemekhov V.V., L'vov A.V. Investigation of the characteristics of the flowing part and the bearing assembly of a reactor installation with a lead coolant. *Trenie i iznos*, 2014, v. 35, no. 4, pp. 489-493 (in Russian).

15. 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).

16. 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).

17. *Handbook of thermohydraulic calculations. Vol. 1*. Ed. B.S. Petukhov. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1987, 360 p. (in Russian).

18. Beznosov A.V., Dragunov Yu.G., Rachkov V.I. Features of the characteristics of the flow-through part of the axial pump model on a high-temperature lead coolant. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2013, no. 4 (101), pp. 206-213 (in Russian).

19. Beznosov A.V., Lvov A.V., Bokov P.A., Lemekhov V.V., Larkina Yu.A. *Nuclear Power Plant*. Patent for Utility Model RUS 123183 Monday, June 25, 2012 (in Russian).

20. Drozdov Yu.N., Beznosov A.V., Makarov V.V., Puchkov V.N., Antonenkov M.A., Kuznetsov D.V. Investigation of the friction nodes of nuclear installations operating in the environment of heavy high-temperature liquid-metal coolants. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aehrokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2009, no. 3-1 (19), pp. 128-136 (in Russian).

21. 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 lead-bismuth coolants. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*, 2009, no. 4. pp. 155-160. (in Russian).

22. 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).

23. Chechyotkin A.V. High-Temperature Coolants. Moscow. Energia Publ., 1971, 496 p. (in Russian).

#### Authors

Beznosov Alexander Viktorovich, Professor

E-mail: beznosov@nnov.ru

Lvov Alexander Vyacheslavovich, Engineer

E-mail: knyaz\_lvov@mail.ru

Bokov Pavel Andreevich, Assistant Lecturer

E-mail: bokow\_pavel@mail.ru

Bokova Tatiana Alexandrovna, Assistant Professor

E-mail: tatabo@bk.ru

Lukichev Nikita Sergeevich, Undergraduate Student

E-mail: nikitlukichev@mail.ru