

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ (05.04.00)

УДК 62-137

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-8-13

## Экспериментальное исследование рабочего процесса в пилотном образце осевого насоса с трехрядными мультипланными проточными частями

Е.А. Рябцев

Представлены этапы подготовки к физическим испытаниям и результаты исследования рабочего процесса в пилотном образце вертикального конденсатного насоса первого подъема с уникальной осевой активной частью. Приведены актуальные параметры макетного варианта полирядной гидромашин, предназначенного для физических экспериментов, и изложены основные этапы проектной разработки инновационного агрегата. Дано описание и показана конструкция рабочих органов трехрядной компоновки и подробно рассмотрен способ изготовления рабочего колеса и направляющего аппарата предлагаемой сложной многорядной конфигурации. В качестве метода изготовления рабочих органов полирядного насоса выбран перспективный в машиностроении способ прототипирования. Предложена технология изготовления активной части трехрядного макетного насоса на 3D-принтере.

Приведена информация об экспериментальном стенде, созданном на научно-производственной базе НИУ «МЭИ». Описаны проблемы, с которыми пришлось столкнуться при его проектировании и наладке оборудования, а также даны способы их решения. Показан вертикальный трехрядный насос, смонтированный на стенде и подготовленный к серии испытаний по существующим стандартам. В сжатом виде предложена информация о проведении физических экспериментов. Проанализированы результаты испытаний полирядного насоса. Изготовлены однорядные осевые рабочие органы, спроектированные по традиционному образцу. Проведено сравнение результатов испытаний трехрядного насоса с однорядным осевым.

*Ключевые слова:* проточная часть, осевой, полирядный и конденсатный насосы, 3D-принтер.

*Для цитирования:* Рябцев Е.А. Экспериментальное исследование рабочего процесса в пилотном образце осевого насоса с трехрядными мультипланными проточными частями // Вестник МЭИ. 2018. № 2. С. 8—13. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-8-13.

## Experimental Study of the Working Process in a Pilot Sample of an Axial Pump with Three-Row Multiplane Flow Paths

Е.А. Ryabtsev

The article describes the stages of preparing the pilot sample of a vertical first-lift condensate pump with a unique axial active part for physical tests and the results from studying the working process in it. The actual parameters of the polyrow hydraulic machine mockup version intended for carrying out physical experiments are given, and the main stages of elaborating the innovative unit's design are outlined. The working members used in the three-row arrangement are described, their design is shown, and the method for manufacturing the impeller and guide vanes of the proposed complex multirow configuration is considered in detail. Prototyping — an advanced approach practiced in the machinery constructing industry — has been chosen as the method for manufacturing the polyrow pump working members. A technology for manufacturing the active part of a three-row mockup pump on a 3D printer is proposed.

Information about the experimental test setup constructed at the research-and-production facilities of the Moscow Power Engineering Institute "National Research University" is given. The difficulties encountered in designing the experimental test setup and in adjusting its equipment are described together with the methods used to resolve them. The vertical three-row pump assembled at the experimental test setup and

prepared for a series of tests according to existing standards is shown. Information on carrying out the physical experiments is briefly outlined. The results from the polyrow pump tests are analyzed. Single-row axial working members designed according to the conventional pattern have been manufactured. The results from tests of the three-row pump and the single-row axial pump have been compared with each other.

*Key words:* flow path, axial pump, polyrow pump, condensate pump, 3D-printer.

*For citation:* Ryabtsev E.A. Experimental Study of the Working Process in a Pilot Sample of an Axial Pump with Three-Row Multiplane Flow Paths. MPEI Vestnik. 2018;2:8—13. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-2-8-13.

На кафедре паровых и газовых турбин НИУ «МЭИ» был разработан проект по модернизации насосного оборудования мощных тепловых электростанций [1, 2]. К направлениям совершенствования насосов основного цикла (в частности, конденсатных насосов первого подъема) относятся повышение антикавитационных качеств и надежности, увеличение ресурса и межремонтного периода при сохранении достаточного уровня энергетических показателей.

Выводы о перспективах использования новой конструкции полирядных проточных частей (ПЧ) в конденсатных насосах сформулированы в [2, 3] и основаны на результатах компьютерных экспериментов, экспертных оценках и общей теории лопастных машин. Для подтверждения конкурентоспособности полирядных конденсатных нагнетателей первого подъема в целом по антикавитационным качествам по сравнению с известными аналогами [4] потребовалось провести экспериментальное исследование рабочего процесса полирядных рабочих органов (РО) в активных частях осевых насосов. Для указанных целей были созданы пилотный образец гидромшины с полирядными осевыми РО, включающими в себя рабочее колесо (РК) с мультипланной системой решеток лопастей и соответствующий направляющий аппарат (НА), и экспериментальный стенд.

Для обеспечения объективных результатов физического эксперимента:

- исследованы возможности изготовления с высокой степенью точности полирядных ПЧ предлагаемого насоса;
- сформирован технический проект модели насоса на основе расчетно-теоретического исследования

и конструкции проектного варианта [1, 2]; разработан экспериментальный стенд;

- проработаны узлы гидромшины, изготовлены детали, выполнены сборка агрегата, отладка стенда, закупка необходимого оборудования и т.д.;

- проведены физические эксперименты по программе испытаний и проанализированы результаты согласно [5].

Проектирование рабочей модели именно на размеры и параметры, указанные в таблице, помогает соблюсти геометрическое подобие активной части с ранее спроектированным натурным конденсатным агрегатом [2, 3].

#### Исходные параметры натурального и модельного насосов

Параметры	Насосы	
	натурный	модельный
Напор $H$ , м	16	1,0
Подача $Q$ , м <sup>3</sup> /ч	2340	32,4
Диаметр трехрядного рабочего колеса по периферии $D$ , м	0,6	0,15
Коэффициент быстроходности $n_s$	367	346
Частота вращения приводного двигателя $n$ , об/мин	1000	

Геометрическое подобие изготовленной рабочей модели насоса соблюдается благодаря пропорциональности размеров полирядной ПЧ и активной части проектного насоса.

Для изготовления сложной проточной части (рис. 1), форма которой обусловлена разделением по-

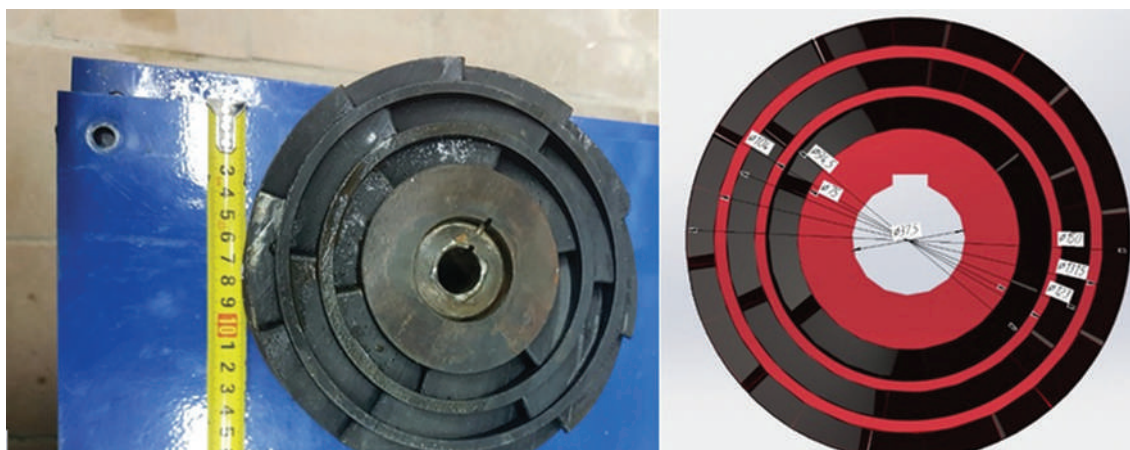


Рис. 1. Изготовленная активная часть пилотного насоса и модель с основными диаметрами рядов

тока на три цилиндрических ряда в целях уменьшения неравномерности и нестационарности, была применена технология 3D-печати [6 — 8]. Для уменьшения погрешности сборки венцов в продольном направлении (склеивание эпоксидной смолой частей РО вдоль на валу) был предложен вариант изготовления полирядных ПЧ насоса на 3D-принтере, т.е. разделения единого на несколько частей секущей плоскостью по 45° и дальнейшего склеивания по «косым» поверхностям (см. рис. 1). Данный метод изготовления применим и к стальным РО, только вместо склеивания может быть использован сварочный процесс. Возможность разделения РО на несколько составных частей позволяет избежать проблем усадки материала и повышает жесткость конструкции.

Разделенные части РК и НА «насаживали» на вал, поверхности заранее притирали, а затем склеивали по поверхностям стыка. После склеивания эпоксидной смолой, РО подвергли механической обработке на фрезерном станке.

Для снятия шероховатости и в целях обеспечения гладкой поверхности лопастей изделие было обработано парами ацетона в специальной ацетоновой бане.

Существующие стандарты (как рекомендованные Российской ассоциацией производителей насосов, так и методические указания по испытаниям конденсатных насосов в схеме паротурбинных двигателей [9]) предусматривают проведение различных испытаний опытных образцов, например, опытного определения напорной, энергетической и кавитационной характеристик.

Для проведения физических испытаний осевого насоса с трехрядной активной частью был собран стенд на основе материально-технической базы НИУ «МЭИ». В качестве измерительной аппаратуры стенда использованы пьезометры, что связано с низкими напорами модели, обусловленными подпорным назначением натурной гидромашины. Для измерения подачи установлен расходомер, выходной сигнал от которого поступал на дисплей.

При проектировании стенда для испытаний трехрядных осевых насосов пришлось столкнуться со следующими техническими проблемами:

- рассматриваемый полирядный насос с параллельной работой рядов активной части имеет малый напор и большой расход, следовательно требуется и повышенная точность при измерении давлений на выходном участке;
- необходимо обеспечить одинаковые значения компонент полной механической энергии на выходе из рядов насоса;
- основным видом потерь энергии в проточной части трехрядных органов являются гидравлические потери, а также потери на смешивание потока за направляющим аппаратом, что сложно поддается физическим определениям на собранном оборудовании.

На рис. 2 показан полирядный насос в собранном виде и смонтированный на стенде. Следует отметить, что конструкция насоса предусматривает установку однорядных монопланых осевых колес и аппаратов для более полного сравнения РО по антикавитационным качествам и энергоэффективности.

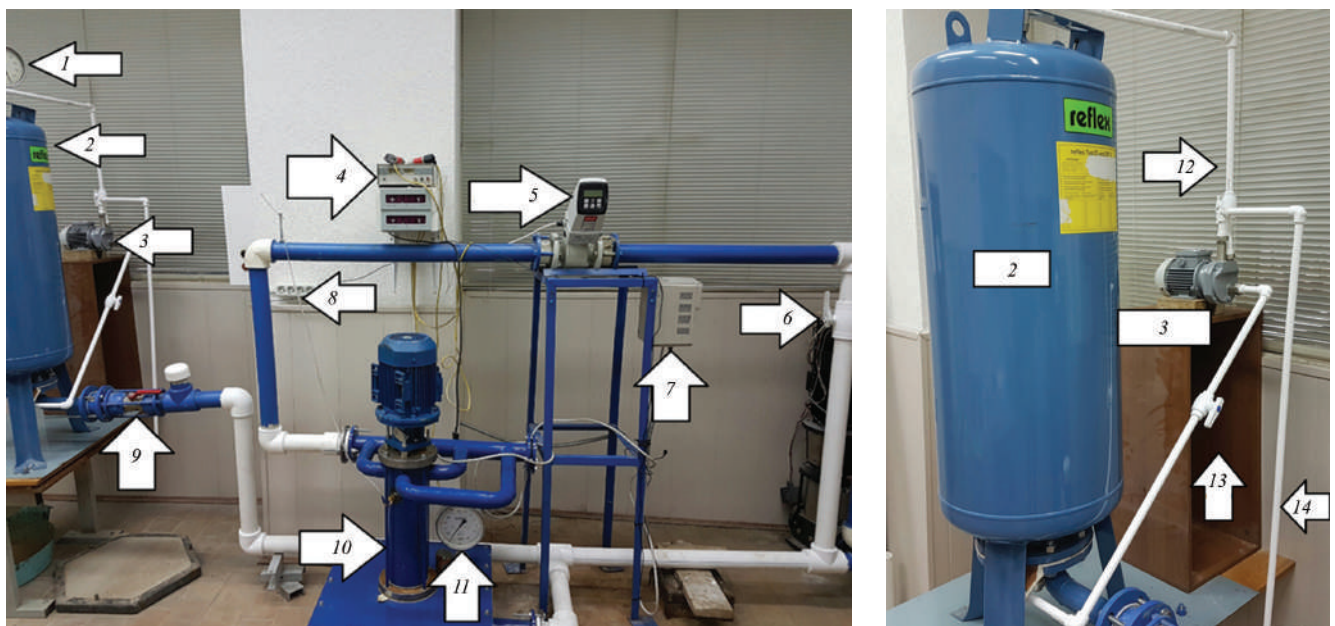


Рис. 2. Полирядный пилотный насос на стенде НИУ «МЭИ»

1 — вакуумметр; 2 — бак; 3 — вакуумный насос НВВ-6; 4 — ваттметр; 5 — расходомер; 6 — задвижка; 7 — частотный преобразователь; 8 — пьезометр на стороне нагнетания насоса; 9 — задвижка бака; 10 — полирядный вертикальный насос; 11 — мановакуумметр в коллекторе; 12, 13 — задвижки вакуумного насоса; 14 — слив

Для создания вакуума бак установлен на раму с целью обеспечения воздушной подушки. Стенд в данной компоновке предусматривает дроссельные клапаны на входе и выходе. Обвязка трубопроводами исполнена таким образом, чтобы в насосе при появлении кавитации она не могла распространяться далее. Приборы установлены так, чтобы кавитация, воздушные пузырьки и дегазация не влияли на работу приборов, особенно на устройство измерения подачи. Для создания вакуума использован водокольцевой вакуумный насос НВВ-6. Уровень воды в резервуаре определен на уровне оси вращения рабочего колеса вакуумного насоса (на уровне осей вращения вала электродвигателя) и поддерживался автоматически.

Кавитационные испытания проводились согласно стандартам РАПН (технический комитет по стандартизации «Насосы» ТК 245).

Насос залили водой, закрыли задвижку, затем запустили насос и с помощью задвижки установили заданный режим работы так, чтобы показание устройств измерения давления соответствовало выбранной подаче. Давление в коллекторе с помощью вакуум-насоса ступенчато понижали. Задвижкой поддерживали подачу постоянной. В каждом режиме измеряли: частоты вращения, подачи, давления (разрежения) на входе и выходе, температуру жидкости в коллекторе.

Во время проведения экспериментов пришлось столкнуться с явлением всасывания воздуха в ПЧ при неглубоком вакууме. Резкое падение напора, связанное с подсосом воздуха в ПЧ, монорядного осевого колеса в данной конструкции насоса происходило при вакууме  $0,23 \text{ кгс/см}^2$ , а падение напора в полирядном колесе при  $0,33 \text{ кгс/см}^2$ . Подобный эффект объясняется тем, что при проникновении воздушной фракции в ПЧ из-за наличия центробежных сил воздух стремится к малым радиусам. В случае исполнения полирядного осевого колеса из-за наличия трех рядов воздух проникает сперва во втулочный ряд, а центральный и периферийный ряд продолжают развивать напор. Иными словами, однорядное монопланное осевое колесо восприимчиво к подсосу воздуха из-за большей неравномерности за счет вылета лопастей.

Для ликвидации явления подсоса воздуха в ПЧ уплотнения насоса (рис. 3) были заменены на трущую пару (двойное торцовое уплотнение), которая захлопывается при вакууме, обеспечивая максимальную герметичность.

Для полного суждения об антикавитационных качествах и энергоэффективности, а также построения выверенных характеристик РК и НА, проведение экспериментов должно осуществляться совместно с однорядной монопланной лопастной активной частью. На рис. 4 показаны модели осевых РО, предназначенных для установки в универсальную модель полирядного насоса КН1. Однорядные РО были спроектированы по известным методикам [10]. Диаметр втулки осевого колеса принят  $d_{\text{вт}} = 75 \text{ мм}$  и соответствует диаметру втулки



Рис. 3. Герметичное уплотнение вала модельного полирядного насоса

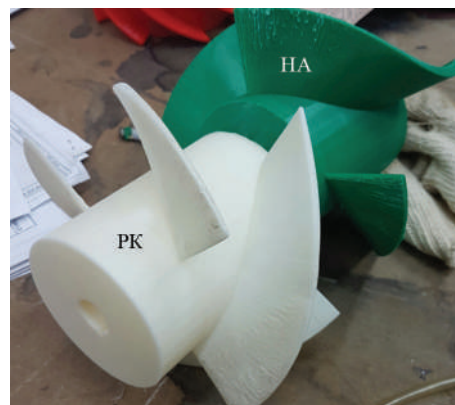


Рис. 4. Модель однорядных монопланнх осевых РО для установки в пилотный насос КН1

полирядного колеса, то есть удалось добиться подбора ПЧ; вместо рядов установлены традиционные лопасти с углами  $\beta_{1n}$ , равными  $13$  и  $22^\circ$ . Отдельные параметры традиционного осевого РК и НА (коэффициент кавитации  $\sigma$  и срабатываемая циркуляция) уточнены с помощью решения обратной задачи теории решеток [11]. Рабочее колесо спроектировано на больший напор ( $2 \text{ м}$ ) с учетом переменного напора вдоль радиуса и учета потерь в НА и отводе. Испытания однорядного осевого насоса проводили по тем же методикам.

В связи с тем, что стенд оснащен системой регулирования (как задвижкой, так и частотным преобразователем) можно провести серию экспериментов. Погрешности измерений определены по [5] и соответствуют стандартам.

Напор полирядного насоса и однорядного осевых насосов  $H$  находили как разность удельных энергий между всасыванием (в данном случае — коллектором, подключенным к линии всасывания (см. рис. 2)) и нагнетанием, иными словами, как прирост удельной механической энергии, сообщаемой насосом жидкости:

$$H = H_n - H_b = \left( z_n + \frac{p_n}{\rho g} + \frac{v_n^2}{2g} \right) - \left( z_b + \frac{p_b}{\rho g} + \frac{v_b^2}{2g} \right),$$

где  $p_n, p_b, v_n, v_b, z_n, z_b$  — абсолютные давления (Па), скорости жидкости (м/с) и пьезометрические высоты (м)

на выходе и входе насоса;  $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Коэффициент полезного действия (КПД) определяли следующим образом [5]:

$$\eta = \frac{0,981\rho gQH}{N_d},$$

где  $N_d$  — суммарная мощность, потребляемая насосом по всем трем фазам электродвигателя, Вт. Таким образом, КПД выглядит как отношение мощности, отдаваемой насосом жидкости, к мощности потребляемой насосом.

Ввиду того, что конструкции натурального [3] и пилотного насосов идентичны по варианту исполнения ПЧ, то вполне можно применить для анализа кавитационных явлений следующую формулу, поскольку в нее входят только внешние характеристики гидромашины.

Кавитационный запас равен

$$\Delta h = H_y + H_{вб} - H_{нп} - h_r - H_k,$$

где  $H_y$  — параметр кавитации установки, т. е. подпор насоса (1 м);  $H_{вб}$  — давление воздуха в баке, определяемое как разность атмосферного давления и показаний вакуумметра;  $H_{нп}$  — давление насыщенных паров на входе в насос, равное 0,24 м при температуре жидкости  $t = 20^\circ\text{C}$ ;  $h_r$  — гидравлические потери во всасывающей магистрали (0,2 м), определенные для форсированного режима работы по подаче при  $Q = 32,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $H_k$  — параметр кавитации рабочего колеса насоса.

Точно установить момент критического начала воздействия кавитации на  $Q$  и  $H$  затруднительно ввиду технологических ограничений, поэтому в зависимости от точности наблюдений, примем за  $\Delta h_{кр}$  то значение, при котором подача насоса падает на 1%.

Опытное значение  $\Delta h_k = 3,4...3,65 \text{ м}$  в диапазоне подач  $Q = 4...7 \text{ л/с}$ , при данном значении также появляется шум, характеризующий наступление местной кавитации.

На рис. 5, а, б приведено сравнение напорной и энергетической характеристик однорядного монопланного осевого насоса и трехрядного мультипланного образца.

По результатам испытаний были построены срывные кавитационные характеристики (рис. 6) и проведено дальнейшее сравнение.

Исходя из результатов испытаний и сопоставлений осевого однорядного и полирядного насосов, можно сделать следующие выводы:

- полирядное колесо смогло выдержать более глубокий вакуум (рис. 6), что обусловливается снижением неравномерности в цилиндрических проточных частях и меньшим вылетом лопастей, влияющим на нестационарность потока;
- полирядные насосы имеют меньший (см. рис. 5, б) сопоставимый КПД с перспективой дальнейшего повышения. Значения меньшего КПД у предлагаемого

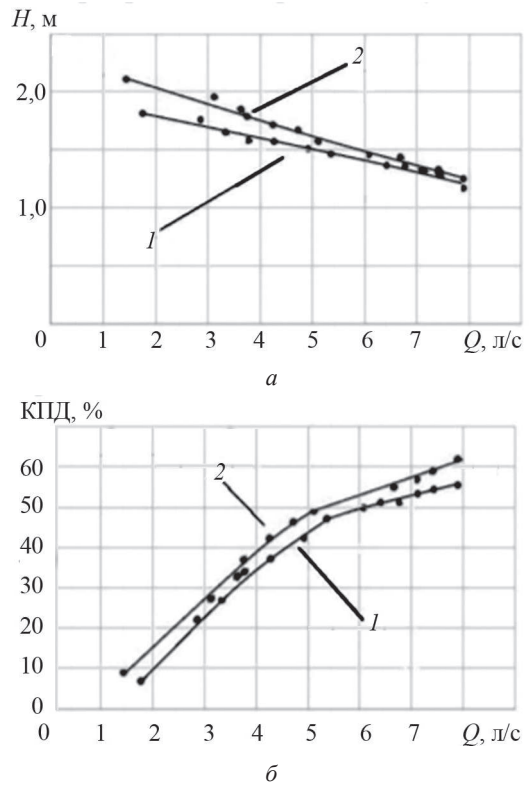


Рис. 5. Сравнение экспериментальных характеристик полирядного мультипланного (1) и однорядного монопланного (2) насосов:

а — по напору; б — по КПД

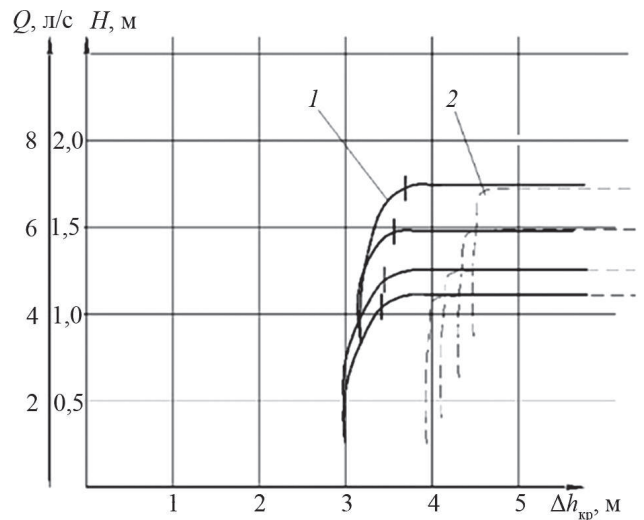


Рис. 6. Сравнения экспериментальных кавитационных характеристик полирядного мультипланного (1) и однорядного монопланного (2) осевого насосов

образца обусловлены увеличением щелевых потерь между трехрядными РК и НА, ввиду конструкции самих полирядных РО, а также перетечками в зазоре между РО и несовершенством технологии изготовления.

Таким образом, результаты испытаний пилотного образца трехрядного осевого насоса позволяют прогнозировать эффективное применение полирядной

структуры РО в конденсатных агрегатах, благодаря повышенным антикавитационным качествам. Для уточнения свойств подобных РО в общепромышленных типах насосов следует провести расчетно-теоретические исследования, включающие в себя моделирование жидкости различной вязкости в трехрядных ПЧ.

## Литература

1. **Моргунов Г.М.** Разработка насосов нового поколения питательной системы мощных энергоблоков // Теплоэнергетика. 2013. № 2. С. 42—53.

2. **Моргунов Г.М., Купцов С.Ю., Рябцев Е.А.** Перспективность разработок полирядных осевых насосов и варианты их проточных частей для энергоагрегатов различного назначения // Компрессорная техника и пневматика. 2015. № 5. С. 19—25.

3. **Рябцев Е.А., Моргунов Г.М.** Результаты исследования рабочего процесса осевого трехрядного лопастного конденсатного насоса первого подъема для энергоблока гигаваттного класса // Инженерный вестник. 2015. № 6 [Электрон. ресурс] <http://engbul.bmstu.ru/doc/778745.html> (дата обращения 22.10.2017).

4. **Тришкин С.К., Солодченков В.Ф.** Пути повышения эффективности работы конденсатных насосов типа 1КсВ для тепловых электростанций // Насосы и оборудование. 2014. № 6. С. 20—24.

5. **ГОСТ 6134—2007.** Насосы динамические. Методы испытаний.

6. **Купцов С.Ю.** Первый этап подготовки к физическим испытаниям полирядного лопастного насоса двустороннего действия // Молодежный науч.-техн. вестник. 2014. № 7 [Электрон. ресурс] <http://sntbul.bmstu.ru/doc/724615.html> (дата обращения 22.10.2017).

7. **Купцов С.Ю.** Современные способы создания модельных проточных частей применительно к полирядным насосам для питательных систем тепловых электростанций // Вестник МЭИ. 2016. № 2. С. 5—11.

8. **Петров А.И.** Особенности учета масштабного эффекта при модельных испытаниях макетов лопастных насосов, изготовленных на 3D-принтерах // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2015. № 4 [Электрон. ресурс] <http://maplantsjournal.ru/doc/820486.html> (дата обращения 22.10.2017).

9. **СО 34.41.710.** Методические указания по испытаниям конденсатных насосов в схеме паротурбинных электростанций.

10. **Зимницкий В.А., Умов В.А.** Лопастные насосы. Л.: Машиностроение, 1986.

11. **Моргунов Г.М.** Расчет безотрывного обтекания пространственных лопастных систем с учетом вязкости // Известия АН СССР. Серия «Энергетика и транспорт». 1985. №1. С. 117—126.

## References

1. **Morgunov G.M.** Razrabotka Nасosov Novogo Pokoleniya Pitatel'noy Sistemy Moshchnyh Energoblokov. Teploenergetika. 2013;2:42—53. (in Russian).

2. **Morgunov G.M., Kuptsov S.Yu., Ryabtsev E.A.** Perspektivnost' Razrabotok Poliryadnyh Osevyh Nasosov i Varianty ih Protochnyh Chastey dlya Energoagregatov Razlichnogo Naznacheniya. Kompessornaya Tekhnika i Pnevmatika. 2015;5:19—25. (in Russian).

3. **Ryabtsev E.A., Morgunov G.M.** Rezul'taty Issledovaniya Rabocheho Protsessa Osevoego Trekhryadnogo Lopastnogo Kondensatnogo Nasosa Pervogo Pod'yema dlya Energobloka Gigavattnogo Klassa. Inzhenernyy Vestnik. 2015;6 [Elektron. Resurs] <http://engbul.bmstu.ru/doc/778745.html> (Data Obrashcheniya 22.10.2017). (in Russian).

4. **Trishkin S.K., Solodchenkov V.F.** Puti Povysheniya Effektivnosti Raboty Kondensatnyh Nasosov Tipa 1KsV dlya Teplovyh Elektrostantsiy. Nasosy i Oborudovanie. 2014;6:20—24. (in Russian).

5. **ГОСТ 6134—2007.** Nasosy Dinamicheskie. Metody Ispytaniy. (in Russian).

6. **Kuptsov S.Yu.** Pervyy Etap Podgotovki k Fizicheskim Ispytaniyam Poliryadnogo Lopastnogo Nasosa Dvustoronnego Deystviya. Molodezhnyy Nauch.-tekhn. vestnik. 2014;7 [Elektron. Resurs] <http://sntbul.bmstu.ru/doc/724615.html> (Data Obrashcheniya 22.10.2017). (in Russian).

7. **Kuptsov S.Yu.** Sovremennyye Sposoby Sozdaniya Model'nyh Protochnyh Chastey Primenitel'no k Poliryadnym Nasosam dlya Pitatel'nyh Sistem Teplovyh Elektrostantsiy. Vestnik MPEI. 2016;2:5—11. (in Russian).

8. **Petrov A.I.** Osobennosti Ucheta Masshtabnogo Effekta pri Model'nyh Ispytaniyah Maketov Lopastnyh Nasosov, Izgotovlennyh na 3D-printerah. Mashiny i Ustanovki: Proektirovanie, Razrabotka i Eksploatatsiya. 2015;4 [Elektron. Resurs] <http://maplantsjournal.ru/doc/820486.html> (Data Obrashcheniya 22.10.2017). (in Russian).

9. **СО 34.41.710.** Metodicheskie Ukazaniya po Ispytaniyam Kondensatnyh Nasosov v Skheme Paroturbinnyyh Elektrostantsiy (in Russian).

10. **Zimnitskiy V.A., Umov V.A.** Lopastnye Nasosy. L.: Mashinostroenie, 1986. (in Russian).

11. **Morgunov G.M.** Raschet Bezotryvnogo Obtekanija Prostranstvennyh Lopastnyh Sistem s Uchetom Vyazkosti. Izvestiya AN SSSR. Seriya «Energetika i Transport». 1985. №1:117—126. (in Russian).

## Сведения об авторе

**Рябцев Егор Андреевич** — аспирант кафедры паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева НИУ «МЭИ», e-mail: [riabtsev1991@yandex.ru](mailto:riabtsev1991@yandex.ru)

## Information about author

**Ryabtsev Egor A.** — Ph.D.-student of Steam and Gas Turbines named after A.V. Shcheglyayev Dept., NRU MPEI, e-mail: [riabtsev1991@yandex.ru](mailto:riabtsev1991@yandex.ru)

Статья поступила в редакцию 03.07.2017