

## СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МУЛЬТИФАЗНЫХ НАСОСОВ

А.М. Бояршинова

a.boyarsh@yandex.ru

SPIN-код: 9826-7817

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

*Рассмотрена проблема перекачивания центробежными, одновинтовыми, двухвинтовыми, трехвинтовыми, осевыми и другими насосами жидкостей с большим содержанием газа. Дано описание различных конструкций насосов, способных перекачивать газожидкостную смесь без специальной подготовки и дополнительных устройств. Выполнено сравнение различных конструкций мультифазных центробежных насосов в зависимости от параметров перекачиваемой среды. Рассмотрены преимущества таких насосов по сравнению с центробежными насосами и основные отрасли их применения, в частности, при добыче полезных ископаемых. Представлена математическая модель проточной части центробежного насоса, на которой основано численное моделирование двухфазных потоков.*

### Ключевые слова

*Центробежный насос, мультифазный насос, винтовой насос, гелико-осевой насос, нефтедобыча, гидродинамическое моделирование, двухфазная среда*

Поступила в редакцию 23.04.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

---

**Введение.** Проблема перекачивания жидкостей с большим содержанием газа возникла давно и является актуальной на данном этапе развития гидромашиностроения. Например, нефтедобыча — одна из многих отраслей промышленности, в которой требуется перекачивать жидкость с большим содержанием газа и наличием твердых включений. Одним из основных осложняющих факторов при скважинной добыче нефти является наличие в перекачиваемом сырье нерастворенного газа. По мере увеличения газовой фазы происходит рост газовых пузырьков, что ведет к уменьшению выходного сечения насоса, а значит, и к снижению его параметров. Более подробно это описано в работе [1]. При дальнейшем увеличении количества газа происходит запираание выходного канала насоса воздушным пузырем, в результате чего насос прекращает подачу. Поэтому при добыче нефти погружными центробежными насосами обязательно применяют устройства, которые отделяют нерастворенный газ от перекачиваемой жидкости, — газосепараторы. Однако мультифазный насос — это альтернативное устройство, способное перекачивать газожидкостную смесь без дополнительных агрегатов. Такие насосы могут быть сконструированы в горизонтальном или вертикальном исполнении. Ниже рассмотрены конструкции различ-

ных типов мультифазных насосов, получившие наиболее широкое распространение. Также с подобными конструкциями нефтяных насосов можно ознакомиться в работах [2, 3].

**Одновинтовые насосы.** Одновинтовой насос состоит из винтового ротора, который вращается внутри винтового статора. Геометрия и размеры этих частей таковы, что при установке ротора в статор создается двойная цепь герметичных полостей (ячеек). При вращении ротора в статоре ячейки перемещаются по спирали вдоль оси насоса, не меняя ни формы, ни объема. В результате осуществляется перекачивание продукта от всасывающей до напорной части насоса. Одновинтовой насос представлен на рис. 1.

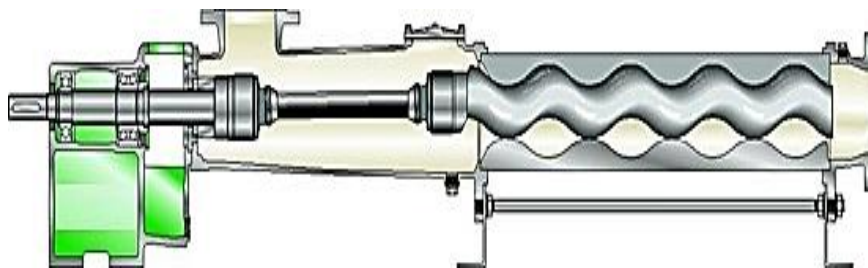


Рис. 1. Одновинтовой насос

**Двухвинтовые насосы.** Насосы данного типа имеют рабочую камеру двойного действия, что позволяет избежать возникновения осевых сил. Винтовые пары из цельной литой заготовки (с целью придать им максимальную жесткость) размещаются в сменной гильзе и имеют противоположное направление витков, при этом винты не соприкасаются друг с другом. Многофазная смесь поступает по всасывающему патрубку в насос, там происходит ее разделение на два потока, которые поступают в свободные полости между витками винтов. Смесь идет вдоль оси насоса к середине, где поступает в нагнетательную полость и увеличивает давление. Для достижения минимальных вибрационных характеристик в рабочем диапазоне насоса передача крутящего момента между винтами пары может осуществляться с помощью шестеренчатой передачи. Это дает возможность мультифазным двухвинтовым насосам перекачивать нефтяные продукты, имеющие высокий показатель газового фактора и высокую степень загрязнения.

Преимущества двухвинтовых насосов, по сравнению с другими винтовыми насосами:

- не требуется регулировать течение потока жидкости через насос, а значит, не нужно устанавливать компенсирующие устройства или регуляторы;
- насосы почти не вызывают пульсаций;
- простота конструкции;
- возможна различная комбинация рабочих характеристик;
- высокая рабочая надежность.

На рис. 2 представлен двухвинтовой насос.

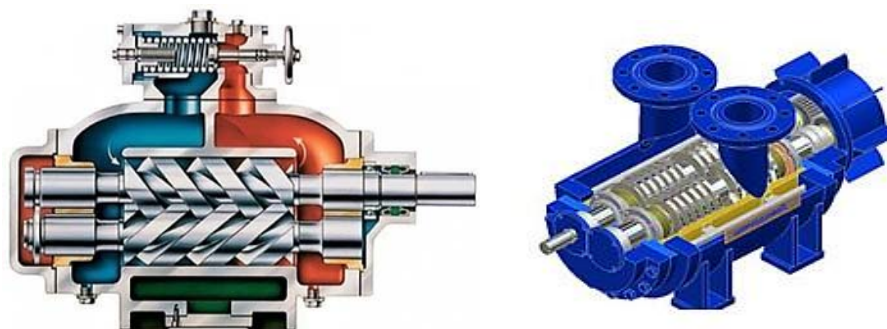


Рис. 2. Двухвинтовой насос

**Трехвинтовые насосы.** Трехвинтовой насос по принципу действия также является объемным и конструктивно похож на двухвинтовой. К его основным конструктивным элементам относят: корпус и крышки, обойма, один ведущий и два ведомых винта, торцевое уплотнение вала, которое может быть одинарным или двойным. У винтов, как правило, специальный профиль нарезки, гарантирующий хорошее взаимное сопряжение винтов. В целом конструкция трехвинтовых мультифазных насосов относительно проста, поэтому обычно ремонт включает в себя простую замену изношенных деталей. Трехвинтовой насос представлен на рис. 3.

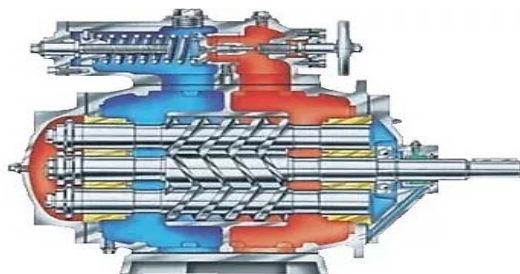


Рис. 3. Трехвинтовой насос



Рис. 4. Гелико-осевой насос

**Гелико-осевой насос.** В отличие от ранее рассмотренных винтовых насосов, гелико-осевой насос представляет собой многоступенчатую динамическую машину (рис. 4). На валу насоса находятся последовательно расположенные осевые ступени, каждая из которых состоит из рабочего колеса и направляющего аппарата. В результате увеличения давления в каждой гелико-осевой ступени перекачиваемая среда сжимается, тем самым предотвращая образование «газовой подушки». Проточная часть позволяет перекачивать большие объемы газа. Вследствие больших зазоров и использования материалов с повышенной изно-

стойкостью конструкция устойчива к воздействию песка. Полностью извлекаемый патрон облегчает техническое обслуживание. Также с двух сторон ротора насоса установлены торцевые уплотнения и подшипники.

Результаты сравнения винтовых и гелико-осевых насосов представлены в таблице.

**Сравнение мультифазных насосов**

Параметры перекачиваемой среды	Типы мультифазных насосов			
	Винтовые			Гелико-осевые
	Одновинтовые	Двухвинтовые	Трехвинтовые	
Вязкость, сСТ	До 3000	До 1500	До 1000	До 3000
Температура, °С	До 140	До 100	До 150	До 250
Содержание механических примесей, % (по массе)	Не более 2	Не более 0,2	Не более 0,2	Не более 2
Подача, м <sup>3</sup> /ч	До 1000	До 500	До 500	До 4500
Развиваемое давление, бар	До 250	До 400	До 400	До 200
Содержание газа, %	До 80	До 90	До 80	До 90

Согласно данным, приведенным в таблице, мультифазные насосы могут работать при высоких значениях расхода и давления, со средами, содержащими большие количества газа, и переносят колебания содержания газовой фазы. Кроме того, насосы устойчивы к перекачиванию жидкости с наличием песка или иных абразивных частиц. Описание конструкций насосов, работающих в похожих условиях, приведено в статьях [4, 5].

Основные отрасли применения мультифазных насосов:

- горнодобывающая промышленность;
- нефтяная промышленность;
- газовая промышленность;
- пищевая промышленность;
- химическая промышленность;
- целлюлозно-бумажная промышленность;
- горнорудная промышленность и др.

Рассмотрим основные преимущества мультифазных насосов по сравнению с центробежными:

- возможность перекачивать нефть и другие густые и вязкие жидкости без подогрева;
- насосы устойчивы к абразиву, чрезвычайно надежны и ремонтпригодны;
- при использовании мультифазных насосов при нефтедобыче устьевое давление скважины существенно снижается, что ведет к более продуктивной добыче;
- мультифазные нефтяные насосы могут одновременно качать загазованную нефть с содержанием газа до 90 %, а также с наличием твердых включений (песка, кокса, нефтешлама и т. д.);

– способность мультифазного насоса перекачивать нефть, мазут, асфальт, гудрон, и другие нефтепродукты с твердыми включениями позволяет отказаться от дорогих и требующих постоянного обслуживания фильтров. При использовании нефтяных центробежных насосов фильтры приходится устанавливать непосредственно перед насосом для защиты проточной части нефтяного насоса и торцевого уплотнения от абразивного износа. При перекачивании жидкости с помощью мультифазного насоса фильтры можно размещать уже непосредственно на установках подготовки и переработки нефти, что дает значительную экономию;

– способность мультифазных нефтяных насосов перекачивать нефть вместе с газом позволяет устанавливать сепараторы для отделения нефти от газа и компрессоры в удобном месте или вообще отказаться от них;

– нефтяные центробежные насосы не могут перекачивать газ вместе с нефтью, поэтому приходится отделять газ от нефти, сжигать газ на факелах или тянуть отдельный трубопровод для подачи газа на газоперерабатывающий завод. Мультифазный насос может качать газ вместе с нефтью по одной общей трубе и проводить разделение в удобном месте, позволяя избежать лишнего дублирования оборудования;

– для перекачивания летучих, взрывоопасных или ядовитых жидкостей, содержащих твердые включения (бензин с нефтешламом, коксом, этилен, метанол и др.), мультифазный насос может быть оборудован магнитной муфтой. Подобная конструкция позволяет решить проблему герметичных центробежных химических насосов (невозможность перекачивать загрязненные, опасные, абразивные жидкости).

**Математическая модель рабочего процесса мультифазного насоса.** Современные технологии многофазного перекачивания завоевывают все более широкое признание в нефтедобывающей промышленности. Такие насосы уже были установлены и размещаются сейчас как на суше, так и на морских платформах в самых различных природных и климатических условиях. Но при проектировании мультифазных насосов инженеры сталкиваются с трудностями расчета мультифазных потоков. Избежать этих трудностей позволяет использование методов численного моделирования потока двухфазной среды.

Приведем базовые уравнения гидродинамики, с помощью которых описывается двухфазное течение при моделировании.

*Уравнение сохранения массы:*

$$\frac{\partial(a_i \rho_i)}{\partial t} + \frac{\partial(a_i \rho_i \bar{u}_x)}{\partial t} + \frac{\partial(a_i \rho_i \bar{u}_y)}{\partial t} + \frac{\partial(a_i \rho_i \bar{u}_z)}{\partial t} = 0.$$

*Уравнение сохранения количества движения:*

$$\rho \left[ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ T_{ij}^{(v)} - \rho \langle u_i u_j \rangle \right].$$

Уравнения записаны с учетом наличия двух фаз и их концентраций, где  $a_i$  — концентрация  $i$ -й фазы;  $\rho_i$  — плотность  $i$ -й фазы;  $\bar{u}_i$  — осредненные по времени проекции скоростей жидкости на соответствующие оси;  $\bar{p}$  — осредненное по времени давление;  $T_{ij}^{(v)} = 2\mu\bar{s}_{ij}$  — тензор вязких напряжений для несжимаемой жидкости;  $\bar{s}_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right]$  — тензор скорости деформации;  $\rho \langle u_i u_j \rangle$  — напряжения Рейнольдса.

Поскольку уравнение Навье — Стокса, осредненное по Рейнольдсу, имеет дополнительные неизвестные напряжения Рейнольдса, система уравнений не замкнута. Дополнительно для замыкания системы используется полуэмпирическая  $k$ - $\omega$ -SST-модель турбулентности [6–9].

Уравнение Релэ — Плессета позволяет описывать рост пузырька в жидкости:

$$R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{R} = \left( \frac{p_{\text{нас}} - p}{p} \right),$$

где  $R$  — радиус пузырька;  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения;  $p_{\text{нас}}$  — давление насыщенных паров.

Пренебрегая членами второго порядка и поверхностным натяжением, получаем упрощенное уравнение:

$$\frac{dR}{dt} = \sqrt{\frac{3}{2} \left( \frac{p_{\text{нас}} - p}{p} \right)}.$$

Эта модель основана на предположении о росте пузырька (процесс парообразования). Ее также можно обратить на модель конденсации. Таким образом, получаем упрощенные уравнения для расчета моделей парообразования и конденсации:

$$\frac{dR}{dt} = F_{\text{пар}} \sqrt{\frac{3}{2} \left( \frac{|p_{\text{нас}} - p|}{p} \right)} \quad \text{при } p_{\text{нас}} > p;$$

$$\frac{dR}{dt} = F_{\text{конд}} \sqrt{\frac{3}{2} \left( \frac{|p_{\text{нас}} - p|}{p} \right)} \quad \text{при } p_{\text{нас}} < p,$$

где  $F_{\text{пар}}$ ,  $F_{\text{конд}}$  — эмпирические коэффициенты.

Для расчета двухфазного потока в качестве граничных условий наиболее предпочтительно задавать давление на входе и скорость на выходе. Также необходимо обозначить начальные значения объемных долей каждой фазы.

Пример отображения результатов гидродинамического моделирования ступени мультифазного (гелико-осевого) насоса показан на рис. 5.

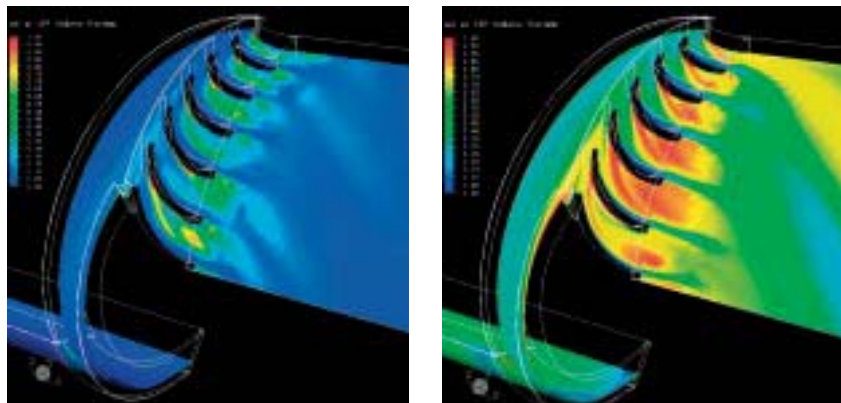


Рис. 5. Модель течения газожидкостной среды в мультифазном насосе при различном газосодержании

Гидродинамическое моделирование позволяет спрогнозировать поведение двухфазного потока в насосе, но поскольку в математической модели присутствуют уравнения с эмпирическими коэффициентами, необходимо проводить испытания насоса, чтобы в дальнейшем сравнить результаты и внести поправки в расчет. При этом сложность проведения таких испытаний заключается в необходимости поддержания строго постоянного газосодержания и температуры жидкости в стенде [10, 11].

**Заключение.** Интерес к многофазной перекачке, которая позволяет создавать на месторождениях меньшие по размеру и более простые в эксплуатации установки, вызван, прежде всего, потребностью в экономически выгодных производственных системах. Многофазная перекачка дает возможность транспортировать смеси жидкости и газа на большие расстояния без необходимости предварительной сепарации. Так как весь нерастворенный газ прокачивается через основной насос, энергозатраты на подъем жидкости снижаются. Поскольку мультифазный насос ничего не выбрасывает в затрубное пространство, можно отказаться от газовых факелов, что снижает вредное воздействие на экологическую среду.

Расчет насоса с помощью гидродинамической модели позволяет автоматизировать процесс подбора мультифазных насосов и рассчитывать характеристики насосов с достаточно высокой точностью. Однако в двухфазных потоках с фазовыми превращениями подобное моделирование еще не получило широкого распространения, поскольку это связано с большими вычислительными трудностями.

## Литература

- [1] Макаров К.А. О физическом смысле числа Рейнольдса и других критериев гидродинамического подобия. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, № 1(25). URL: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1185.html>.
- [2] Петров А.И., Трошин Г.А. Методы модификации проточной части нефтяных магистральных насосов типа НМ. *Инженерный вестник*, 2014, № 11. URL: <http://engsi.ru/doc/744967.html>.

- [3] Петров А.И., Арувелли С.В. Современные тенденции развития насосов для систем жидкостного охлаждения бортового и наземного радиоэлектронного оборудования. *Инженерный вестник*, 2015, № 11. URL: <http://engsi.ru/doc/820059.html>.
- [4] Ломакин В.О., Чабурко П.С. Влияние геометрической формы сопла струйного насоса на его характеристики. *Машиностроение и компьютерные технологии*, 2014, № 12. URL: <http://old.technomag.edu.ru/doc/743907.html>.
- [5] Петров А.И. Методика непрерывного получения характеристик лопастного насоса для переменной температуры и вязкости рабочей жидкости при испытаниях в термобарокамере. *Инженерный вестник*, 2016, № 10. URL: <http://engsi.ru/doc/850931.html>.
- [6] Петров А.И., Валиев Т.З. Расчет процесса пуска центробежного насоса методами гидродинамического моделирования. *Гидравлика*, 2017, № 3. URL: <http://hydrojournal.ru/item/59-raschet-protsesssa-puska-tsentrobezhnogo-nasosa-metodami-gidrodinamicheskogo-modelirovaniya>.
- [7] Ломакин В.О., Петров А.И., Кулешова М.С. Исследование двухфазного течения в осецентрированном колесе методами гидродинамического моделирования. *Машиностроение и компьютерные технологии*, 2014, № 9. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/725724.html>.
- [8] Петров А.И., Исаев Н.Ю. Исследование работы лопастного насоса в зоне отрицательных подач методами гидродинамического моделирования. *Научное обозрение*, 2017, № 13, с. 74–78.
- [9] Петров А.И., Исаев Н.Ю. Гидродинамическое моделирование работы центробежного насоса в зоне отрицательных подач. *Гидравлика*, 2017, № 3. URL: <http://hydrojournal.ru/item/60-gidrodinamicheskoe-modelirovanie-raboty-tsentrobezhnogo-nasosa-v-zone-otritsatelnykh-podach>.
- [10] Артемов А.В., Петров А.И. Современные тенденции развития конструкций стендов для испытаний лопастных насосов. *Инженерный вестник*, 2012, № 11. URL: <http://ainjournal.ru/doc/500480.html>.
- [11] Петров А.И. Системы поддержания теплового баланса в современных стендах для испытаний лопастных насосов. *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*, 2015, № 5. URL: <http://maplants.elpub.ru/jour/article/view/24>.

**Бояршинова Анастасия Максимовна** — студентка кафедры «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Петров Алексей Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.



## CURRENT TRENDS OF DEVELOPMENT AND METHODS OF MODELING THE MULTIPHASE PUMPS

A.M. Boyarshinova

a.boyarsh@yandex.ru  
SPIN-code: 9826-7817

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

The article considers the problem of pumping-over the fluids with high gas content using rotary vane, single-screw, two-screw, three-screw, axial-flow and other pumps. It describes different designs of the pumps capable of pumping-over the liquid-gas mixture without special preparation and auxiliary devices. We compare different designs of the multiphase rotary vane pumps depending on the characteristic of the pumped medium. The article analyzes the advantages of such pumps compared to rotary vane pumps and mentions the primary industries for their application, for instance, the extraction of mineral resources. We introduce a mathematical model of the rotary vane pump flow part, which is the basis for the numerical modeling of two-phase flows.

### Keywords

Rotary vane pump, multiphase pump, screw-type pump, helical-axial pump, oil production, hydrodynamic simulation, two-phase medium

Received 23.04.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

---

### References

- [1] Makarov K.A. On the physical meaning of Reynolds number and other criteria of hydrodynamic similarity. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2014, no. 1(25). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1185.html>.
- [2] Petrov A.I., Troshin G.A. Modification method for flow channel of oil export pumps of MN-type. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2014, no. 11. Available at: <http://engsi.ru/doc/744967.html>.
- [3] Petrov A.I., Aruvelli S.V. Modern development trends for pumps for liquid-cooling system of onboard and ground radio-electronic equipment. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2015, no. 11. Available at: <http://ainjournal.ru/doc/820059.html>.
- [4] Lomakin V.O., Chaburko P.S. Effect of the geometric shape of the jet pump nozzle on its characteristics. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii* [Mechanical Engineering and Computer Science], 2014, no. 12. Available at: <http://old.technomag.edu.ru/doc/743907.html>.
- [5] Petrov A.I. Method of continuous definition of impeller pump characteristics at fluctuating temperature and hydraulic fluid viscosity in process of test in low-pressure chamber. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2016, no. 10. Available at: <http://engsi.ru/doc/850931.html>.
- [6] Petrov A.I., Valiev T.Z. Calculation of the process of starting a centrifugal pump using methods of computational fluid dynamics. *Gidravlika*, 2017, no. 3. Available at: <http://hydrojournal.ru/item/59-raschet-protsesta-puska-tsentrobezhnogo-nasosa-metodami-gidrodinamicheskogo-modelirovaniya>.

- [7] Lomakin V.O., Petrov A.I., Kuleshova M.S. Investigation of two-phase flow in axial-centrifugal impeller by hydrodynamic modeling methods. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii* [Mechanical Engineering and Computer Science], 2014, no. 9. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/725724.html>.
- [8] Petrov A.I., Isaev N.Yu. Study of the work of a vane-type pump in the area of adverse feeds by methods of hydrodynamic modeling. *Nauchnoe obozrenie* [Science Review], 2017, no. 13, pp. 74–78.
- [9] Petrov A.I., Isaev N.Yu. Hydrodynamic modelling of centrifugal pump in the field of negative feeds. *Gidravlika*, 2017, no. 3. Available at: <http://hydrojournal.ru/item/60-gidrodinamicheskoe-modelirovanie-raboty-tsentrobezhnogo-nasosa-v-zone-otritsatelnykh-podach>.
- [10] Artemov A.V., Petrov A.I. Modern trends of developing test bench constructions for impeller pump. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2012, no. 11. Available at: <http://engsi.ru/doc/500480.html>.
- [11] Petrov A.I. System of thermal balance maintenance in modern test benches for centrifugal pumps. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiya* [Machines and Plants: Design and Exploiting], 2015, no. 5. Available at: <http://maplants.elpub.ru/jour/article/view/24>.

**Boyarshinova A.M.** — student, Department of Fluid Mechanics, Hydraulic Machines and Hydraulic and Pneumatic Automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — A.I. Petrov, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Fluid Mechanics, Hydraulic Machines and Hydraulic and Pneumatic Automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.