

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-321708>

Оригинальное исследование



Исследование кавитационных качеств передвижной насосной установки

Д.С. Коньшин¹, Е.М. Конькеев², А.А. Протопопов³, А.И. Петров³¹ СиЭнПи Рус, Москва, Российская Федерация;² Банк «Открытие», Москва, Российская Федерация;³ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Во введении к статье обсуждаются публикации по теме кавитации, вибрации и шума в центробежных насосах, включая вопросы кавитационной эрозии рабочих колес.

Цель исследования — сравнение кавитационных свойств центробежного насоса передвижной насосной установки с предвключенным шнеком и без него методами гидродинамического моделирования (CFD).

Методы исследования. Рассмотрен расчет проточной части предвключенной ступени рабочего колеса, а также описана CFD-модель его гидродинамического моделирования. В CFD-модели использовались уравнения Навье-Стокса, осредненные по числу Рейнольдса, и уравнение неразрывности рабочей жидкости. Для моделирования кавитации применялась модель двухфазной жидкости.

Результаты. Представлены итоговые результаты расчетов, проведенные в указанных выше моделях. Были получены расчетные данные для насоса с рабочим колесом с предвключенной ступенью (шнеком) и без нее. Для рабочего колеса без шнека получен кавитационный запас 4,7 м, что является критическим для такого насоса. Для насоса с рабочим колесом с предвключенным шнеком получен кавитационный запас 1,7 м, что значительно лучше и позволяет продемонстрировать эффективность такого решения.

Заключение. Сформулированы требования о необходимости гидродинамического моделирования для подбора оптимальной проточной части центробежного насоса, для улучшения его кавитационных характеристик.

Ключевые слова: насосная установка; кавитационные качества; кавитация; предвключенный шнек; гидродинамическое моделирование.

Как цитировать:

Коньшин Д.С., Конькеев Е.М., Протопопов А.А., Петров А.И. Исследование кавитационных качеств передвижной насосной установки // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. Т. 17, № 1. С. 17–24. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-321708>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-321708>

Original study article

Investigation of cavitation properties of a mobile pumping unit

Dmitry S. Konshin¹, Evgenii M. Konkeev², Alexander A. Protopopov³, Aleksey I. Petrov³

¹ CNP Rus, Moscow, Russian Federation;

² OTKRITIE Bank (VTB Group), Moscow, Russian Federation;

³ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: In the introduction to the article, a review of publications on cavitation, vibration and noise in centrifugal pumps, including the issues of cavitation erosion of impellers, is carried out.

AIMS: Comparison of cavitation properties of a centrifugal pump of a mobile pumping unit with and without a pre-engineered screw by computational fluid dynamic (CFD) modeling.

METHODS: The calculation of the flow part of a pre-injected impeller stage is described and the CFD model of its hydrodynamic simulation is described. In the CFD model, Navier-Stokes equations averaged over the Reynolds number and the working fluid continuity equation were used. A two-phase fluid model was used to simulate cavitation.

RESULTS: The final results of the calculations carried out in the above models are presented. Calculations were obtained for a pump with impeller with and without an upstream stage (screw). For the impeller without a screw, the cavitation margin of 4.7 m was obtained, which is critical for such a pump. For a pump with an impeller with an upstream auger the cavitation margin is 1,7 m, that is much better and allows to show efficiency of such solution.

CONCLUSIONS: The requirement of hydrodynamic modeling for selection of optimal flow part of centrifugal pump to improve its cavitation characteristics is formulated.

Keywords: *pumping unit; cavitation qualities; cavitation; pre-excited screw; hydrodynamic modeling.*

To cite this article:

Konshin DS, Konkeev EM, Protopopov AA, Petrov AI. Investigation of cavitation properties of a mobile pumping unit. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2023;17(1): 17–24. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-321708>

Received: 28.03.2023

Accepted: 08.04.2023

Published online: 15.04.2023

ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных проблем при эксплуатации центробежных насосов [1–9], влекущей за собой снижение параметров, возникновение шума и вибрации, разрушение рабочих колес, является кавитация [10–14]. Кавитация представляет собой процесс образования и последующего схлопывания пузырьков пара с одновременной конденсацией пара в потоке жидкости и сопровождается акустическим шумом и гидравлическими ударами.

Исходя из вышесказанного, при проектировании любого насоса необходимо рассматривать возможность возникновения кавитации. Существует множество вариантов борьбы с явлением кавитации: изменение меридионального сечения рабочего колеса, увеличение диаметра входа в рабочее колесо, изменение положения входной кромки лопастей, использование предвключенного шнека и др.

Особенно актуальной проблема кавитации оказывается для насосов, работающих в широком диапазоне подач и с большими частотами вращения вала. К таким насосам относится разработанная передвижная насосная установка с приводом от двигателя внутреннего сгорания через мультипликатор (частота вращений вала насоса до 5000 об/мин), давление на входе в насос которой может изменяться в широком диапазоне в зависимости от общего режима работы всего трубопровода и режимов работы предыдущих установок в цепочке. Для бесперебойной работы такой установки требуется рассмотреть варианты повышения ее кавитационных качеств.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящего исследования является сравнение кавитационных свойств центробежного насоса передвижной насосной установки с предвключенным шнеком и без него методами гидродинамического моделирования (CFD).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения сравнения кавитационных свойств передвижной насосной установки с предвключенным шнеком и без него с использованием методов гидродинамического моделирования (CFD) был рассчитан шнек. Шнек — это предвключенная осевая ступень в центробежном насосе, предназначенная для создания подпора на входе в центробежное колесо [15–22]. При проектировании осевой ступени было принято решение о разработке шнека постоянного шага, что упрощает процесс расчета и технологический процесс изготовления, в таком случае угол установки лопастей неизменен по длине шнека:

$$\beta_{2L} = \beta_{1L}.$$

С учетом угла атаки лопасти шнека расчетный угол установки входной кромки вычисляется согласно формуле:

$$\beta_{1c} + i_{1c} = 18^\circ.$$

При проектировании и расчете шнека углы установки лопаток рабочего колеса на входе были приняты равными:

$$\beta_{1a} = 21^\circ; \quad \beta_{1c} = 18^\circ; \quad \beta_{1e} = 16^\circ.$$

На основании проведенного расчета и полученных по методике [22] геометрических параметров была построена 3D-модель шнековой ступени (рис. 1).

Для проверки кавитационных характеристик насоса [19–20] было проведено гидродинамическое моделирование двухфазного течения жидкости в проточной части первой ступени насоса с предвключенным шнеком в программном пакете *STARCCM+* и построены кавитационные характеристики рабочего колеса без предвключенного шнека и с ним.

Расчет был проведен при номинальном режиме работы (расход жидкости 80 м³/ч). Для имитации эксперимента давление на входе в проточную часть рабочего колеса плавно (с шагом в 5–10 кПа) понижалось до наступления срывного режима работы (резкого уменьшения напора). Второй критический режим ввиду трудоемкости его точного определения данным методом, был определен приближенно по методике, изложенной в монографии [22].

Для моделирования кавитации использовалась двухфазная модель жидкости. В качестве физической модели использовался подход, известный как *VOF (Volume of Fluid)*.

При расчете по методу *VOF* многофазная среда полагается единым текучим континуумом, свойства которого

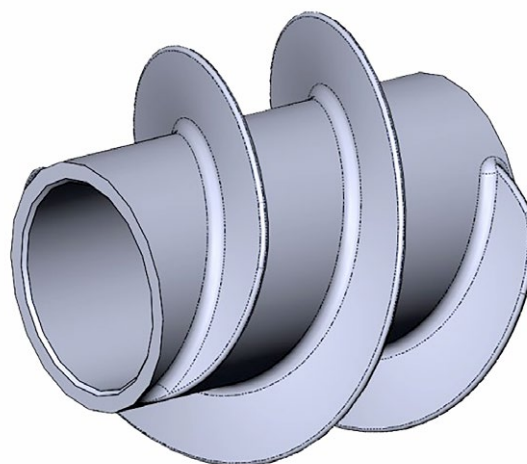


Рис. 1. 3D-модель шнека.
Fig. 1. 3D model of the auger.

меняются пропорционально в согласовании с объемной долей каждой из присутствующих в нем фаз — жидкости и пара:

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V},$$

где V_i — объем каждой из фаз, V — объем расчетной ячейки.

Уравнение для массовой концентрации каждой из фаз имеет вид:

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i V) = 0.$$

Кавитация жидкости моделировалась на основе упрощенной модели Релея-Плессета. Упрощение модели заключается в том, что данная модель не учитывает поверхностного натяжения газового пузыря и влияние вязкости жидкости на скорость его роста. Скорость роста кавитационного пузыря в выбранной модели вычисляется согласно

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = \frac{2}{3} \left(\frac{p_{\text{нп}} - p}{\rho}\right),$$

где R — радиус пузыря, м; $p_{\text{нп}}$ — давление насыщенного пара жидкости, Па; p — давление в окружающей жидкости, Па; ρ — плотность жидкости, кг/м³.

При этом минимальный размер кавитационного пузыря и минимальная концентрация газа в любой из расчетных ячеек строго ограничены достаточно малыми, но тем не менее, ненулевыми, значениями.

Так как для моделирования турбулентного течения в данной работе использовалась модель турбулентности из класса *RANS* (Модели турбулентности на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса) все рассчитываемые величины являются осредненными по времени.

В случае модели несжимаемой жидкости ($p = \text{const}$) указанные выше уравнения можно записать в виде:

- уравнение неразрывности жидкой среды:

$$\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}_y}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} = 0,$$

где \bar{u}_j осредненное значение скорости жидкости в проекции на j -ю ось ($j = 1, 2, 3$);

- уравнение изменения количества движения, осредненное по времени:

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

где \bar{u}_i, \bar{p} — осредненная скорость и осредненное давление, соответственно; $\tilde{T}_{ij}^{(v)} = 2\mu \tilde{s}_{ij}$ — тензор вязких

напряжений для несжимаемой жидкости;

$$\tilde{s}_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] \text{ — тензор скорости деформации;}$$

$\rho \langle u_i u_j \rangle$ — Рейнольдсовы напряжения.

Введение уравнения Навье-Стокса, осредненного по Рейнольдсу [21], делает систему уравнений незамкнутой, так как в нее вводятся неизвестные Рейнольдсовы напряжения. Для того чтобы замкнуть эту систему, в данной задаче была применена полуэмпирическая k - ω SST модель турбулентности, использующая дополнительные уравнения:

- уравнение переноса кинетической энергии турбулентности

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k v_T) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right];$$

- уравнение относительной скорости диссипации энергии турбулентности

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \\ = \alpha \cdot S^2 - \beta \cdot \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_T) \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \\ + 2 \cdot (1 - F_1) \cdot \sigma_{\omega 2} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned}$$

Проточная часть насоса была моделировалась на объемной сетке, состоящей из 2.335.845 ячеек. В ядре потока генерировались многогранные ячейки, у твердых стенок — призматические, что позволило более точно рассчитать течение в пограничном слое. Расчетная сетка представлена на рис. 2.

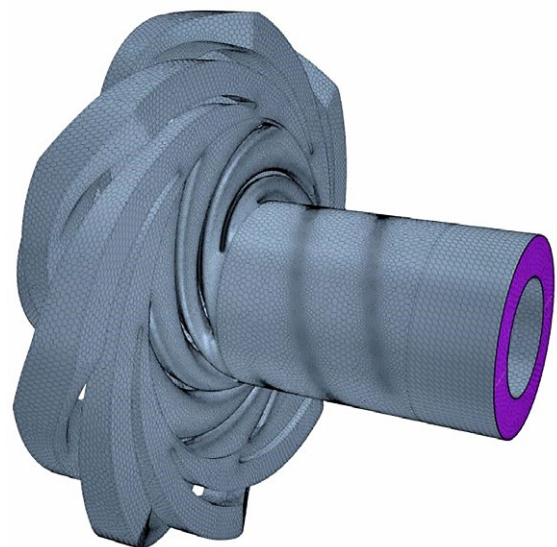


Рис. 2. Расчетная сетка.
Fig. 2. Calculation grid.

Шаг по времени выбирался исходя из частоты вращения рабочего колеса так, чтобы на один лопаточный шаг приходилось не менее 20 временных шагов и вместе с тем, чтобы машинное время расчета не оказалось слишком велико. Шаг по времени был выбран равным 0,0001 с. Число внутренних итераций для каждого временного шага было принято равным 10, как наиболее оптимальное с точки зрения сходимости и времени расчета.

Принимались следующие основные параметры расчетной сетки:

- базовый размер — 3 мм;
- растяжение призматического слоя — 1,3;

- толщина призматического слоя — 33,3% от базового размера;
- число призматических слоев — 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения начальных условий задачи был проведен двухфазный расчет рабочего колеса без шнековой ступени, и получено значение кавитационного запаса 4,7 м, что является недостаточным для работы насосной установки (с учетом сопротивления во всасывающих трубопроводах) без дополнительного подпора на входе в нее (рис. 3, 4).

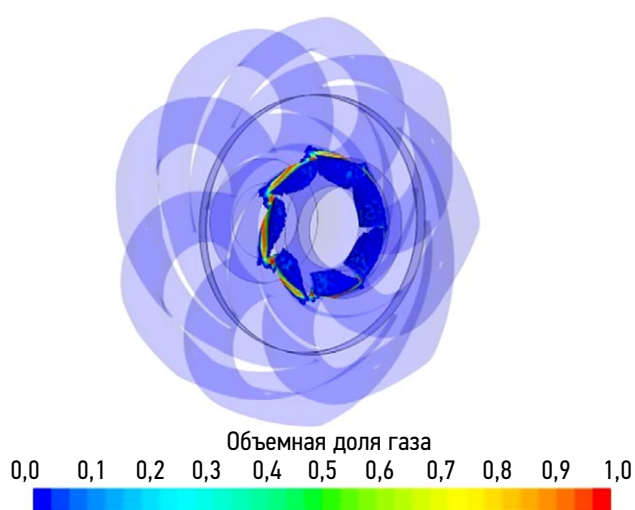


Рис. 3. Распределение паровой фазы при давлении на входе 50 кПа.

Fig. 3. Gas volume fraction. Distribution of the vapor phase at an inlet pressure of 50 kPa.

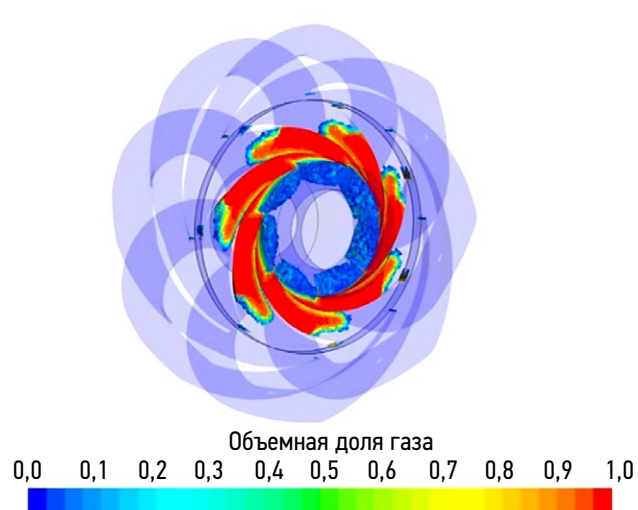


Рис. 4. Распределение паровой фазы при давлении на входе 40 кПа.

Fig. 4. Gas volume fraction. Distribution of the vapor phase at an inlet pressure of 40 kPa.

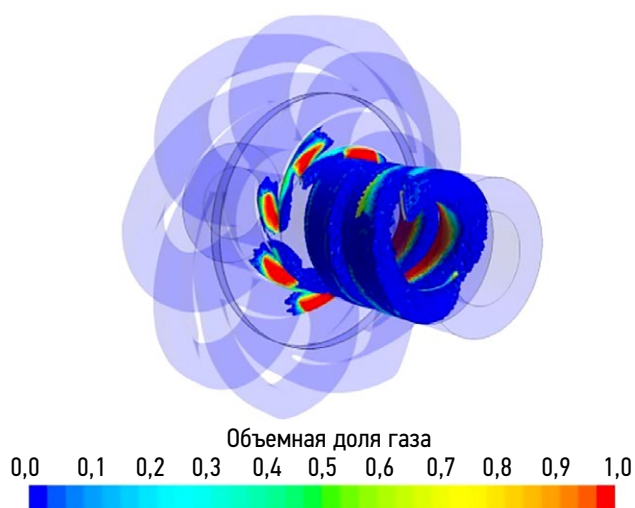


Рис. 5. Распределение паровой фазы при давлении на входе 20 кПа.

Fig. 5. Gas volume fraction. Distribution of the vapor phase at an inlet pressure of 20 kPa.

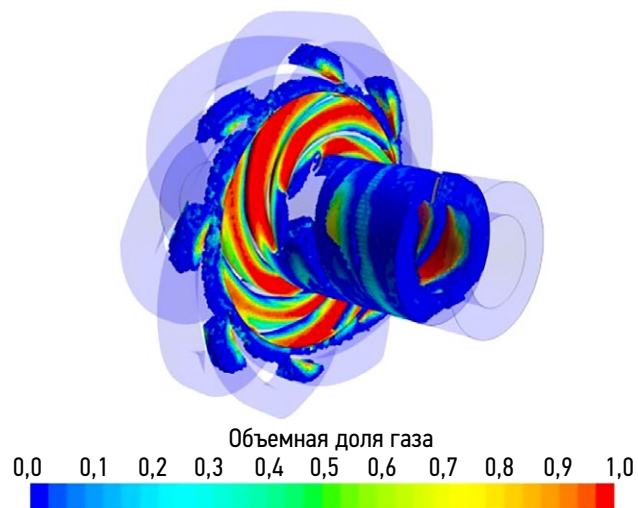


Рис. 6. Распределение паровой фазы при давлении на входе 12 кПа.

Fig. 6. Gas volume fraction. Distribution of the vapor phase at an inlet pressure of 12 kPa.

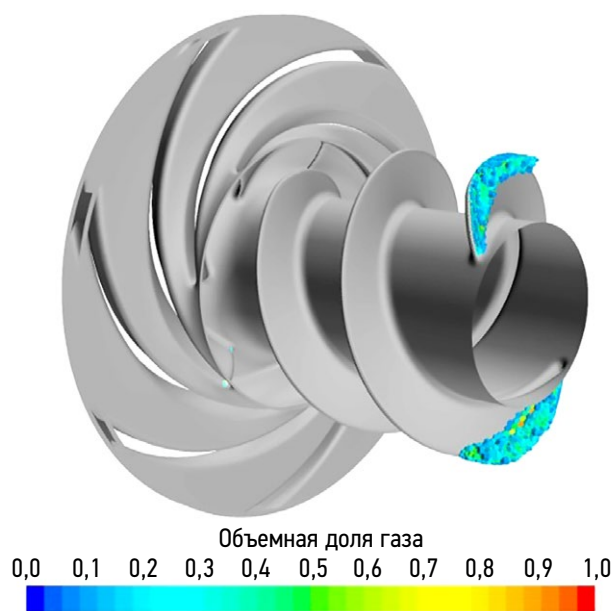


Рис. 7. Рабочее колесо с предвключенным шнеком при атмосферном давлении на входе 101 кПа.

Fig. 7. Impeller with pre-engineered screw at atmospheric inlet pressure 101 kPa.

В целях проверки качества профилирования было рассчитано колесо с шнековой ступенью (рис. 5, 6, 7) и получено значительное уменьшение кавитационного запаса (до 1,7 м), что свидетельствует о высоких кавитационных качествах разработанного насоса.

ВЫВОДЫ

В результате расчета методами гидродинамического моделирования шнековой ступени, установленной на входе в высокооборотный многоступенчатый насос передвижной насосной установки, было получено значительное уменьшение допустимого кавитационного запаса с 4,7 м до 1,7 м.

В результате исследования показано, что кавитационные качества подобных многоступенчатых насосов зачастую хуже требуемых, что свидетельствует о необходимости более подробного рассмотрения данного вопроса в каждом отдельном случае.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handal I., Tkachuk V., Petrovand A., et al. Traditional methods for the design of radial-axial hydraulic turbines with verification in CFD simulation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 779, N 1. P. 012002. doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012002
2. Petrov A., Sinitsyna A. Obtaining the maximum permissible gas content at the inlet to the ESP by computational fluid dynamics modeling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 779, N 1. P. 012006. doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012006

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Д.С. Коньшин — расчеты и графики, написание части текста методов и результатов; Е.М. Конькеев — расчет и графики, написание части текста методов и результатов; А.И. Петров — общее научное руководство, написание выводов, редактирование текста; А.А. Протопопов — написание аннотации и введения, поиск и обзор литературных источников, редактирование текста и формул. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. D.S. Konshin — calculations and graphs, writing part of the text of methods and results; E.M. Konkeev — calculation and graphs, writing part of the text of methods and results; A.I. Petrov — general scientific guidance, writing conclusions, editing text; A.A. Protopopov — writing annotations and introductions, search and review of literary sources, editing text and formulas. The authors confirm the compliance of their authorship with the international *ICMJE* criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Competing interests. The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

3. Teplov O., Lomakin V. Improving the performance of a centrifugal vane pump by installing vortex generators on the suction surfaces of blades // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 779, N 1. P. 012012. doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012012
4. Kalinkin S., Petrov A. Investigation of the influence of the front end clearance on the parameters of a centrifugal pump with an open type impeller // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 779, N 1. P. 012014. doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012014

5. Saprykina M., Lomakin V. The calculation of multiphase flows in flowing parts of centrifugal pump // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 779, N 1. P. 012037. doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012037
6. Chaburko P., Kuznetsov A. Method for leakage measurement in the recirculation path of a hermetic pump // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 779, N 1. P. 012039. doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012039
7. Lomakin V., Valiev T., Chaburko P. Application of optimization algorithms to improve the vibroacoustic characteristics of pumps // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 779, N 1. P. 012044. doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012044
8. Aksenova E., Lomakin V., Cheremushkin V. Experimental study of cavitation resistance of restoring coatings // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 779, N 1. P. 012045. doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012045
9. Kasatkin M., Petrov A. Hydrodynamic modeling of cavitation in a multistage centrifugal pump during its operation in the constant feed mode with a change in the rotor speed of the pump // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 779, N 1. P. 012047. doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012047
10. Kang Y.Z., Feng C., Liu L.Z., et al. Comparison of three kinds of sensors used to identify the incipient cavitation // *Sensor Review*. 2018. Vol. 38, N 1. P. 13–20. doi: 10.1108/SR-05-2017-0078
11. Khoo M.T., Venning J.A., Pearce B.W., et al. Nucleation effects on hydrofoil tip vortex cavitation // *Proceedings of the 21st Australasian Fluid Mechanics Conference, AFMC 2018*. Adelaide: Australasian Fluid Mechanics Society, 2018.
12. Wan W., Liu B., Raza A. Numerical prediction and risk analysis of hydraulic cavitation damage in a high-speed-flow spillway // *Shock and Vibration*. 2018. Vol. 2018, N 1. doi: 10.1155/2018/1817307
13. Li H., Li S. Research on the cavitation in the pilot stage of flapper-nozzle hydraulic servovalve with fluid-structure interaction // *IET Conference Publications*. 2018. P. 783–786. doi: 10.1049/cp.2018.0106
14. Bai F., Saalbach K., Wang L., et al. Investigation of impact loads caused by ultrasonic cavitation bubbles in small gaps // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 64622–64629. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2877799
15. Tkachuk V., Navas H., Petrov A., et al. Hydrodynamic modelling of the impact of viscosity on the characteristics of a centrifugal pump // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 589, N 1. P. 012007. doi: 10.1088/1757-899X/589/1/012007
16. Morozove E., Belov N., Cheremushkin V. Optimization of the radial channel of a centrifugal pump // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 589. P. 012008. doi: 10.1088/1757-899X/589/1/012008
17. Martynyuk O., Petrov A. Optimization of the flow part of the pump for abrasive-containing liquids by hydrodynamic modeling methods // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 963, N 1. P. 012005. doi: 10.1088/1757-899X/963/1/012005
18. Isaev N., Valiev T., Morozova E., et al. Optimization of a radial guide device with a no-vane transfer channel // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 589, N 1. P. 012009. doi: 10.1088/1757-899X/589/1/012009
19. Boyarshinova A., Lomakin V., Petrov A. Comparison of various simulation methods of a two-phase flow in a multiphase pump // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 589, N 1. P. 012028. doi: 10.1088/1757-899X/589/1/012014
20. Saprykina M., Lomakin V. The evaluation of the effect of gas content on the characteristics of a Centrifugal Pump // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 589, N 1. P. 012017. doi: 10.1088/1757-899X/589/1/012017
21. Protopopov A., Bondareva D. On the issue of starting-up overheating of electric motors of centrifugal pumps // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 492, N 1. P. 012002. doi: 10.1088/1757-899X/492/1/012002
22. Петров А.И., Протопопов А.А. Кавитационные испытания центробежного насоса: Учебно-методическое пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022.

REFERENCES

1. Handal I, Tkachuk V, Petrovand A, et al. Traditional methods for the design of radial-axial hydraulic turbines with verification in CFD simulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;779(1):012002. doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012002
2. Petrov A, Sinitsyna A. Obtaining the maximum permissible gas content at the inlet to the ESP by computational fluid dynamics modeling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;779(1):012006. doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012006
3. Teplov O, Lomakin V. Improving the performance of a centrifugal vane pump by installing vortex generators on the suction surfaces of blades. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;779(1):012012. doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012012
4. Kalinkin S, Petrov A. Investigation of the influence of the front end clearance on the parameters of a centrifugal pump with an open type impeller. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;779(1):012014. doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012014
5. Saprykina M, Lomakin V. The calculation of multiphase flows in flowing parts of centrifugal pump. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;779(1):012037. doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012037
6. Chaburko P, Kuznetsov A. Method for leakage measurement in the recirculation path of a hermetic pump. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;779(1):012039. doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012039
7. Lomakin V, Valiev T, Chaburko P. Application of optimization algorithms to improve the vibroacoustic characteristics of pumps. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;779(1):012044. doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012044
8. Aksenova E, Lomakin V, Cheremushkin V. Experimental study of cavitation resistance of restoring coatings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;779(1):012045. doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012045
9. Kasatkin M, Petrov A. Hydrodynamic modeling of cavitation in a multistage centrifugal pump during its operation in the constant feed mode with a change in the rotor speed of the pump. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;779(1):012047. doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012047

10. Kang YZ, Feng C, Liu LZ, et al. Comparison of three kinds of sensors used to identify the incipient cavitation. *Sensor Review*. 2018;38(1):13–20. doi: 10.1108/SR-05-2017-0078
11. Khoo MT, Venning JA, Pearce BW, et al. Nucleation effects on hydrofoil tip vortex cavitation. In: *Proceedings of the 21st Australasian Fluid Mechanics Conference, AFMC 2018*. Adelaide: Australasian Fluid Mechanics Society; 2018.
12. Wan W, Liu B, Raza A. Numerical prediction and risk analysis of hydraulic cavitation damage in a high-speed-flow spillway. *Shock and Vibration*. 2018;2018(1). doi: 10.1155/2018/1817307
13. Li H, Li S. Research on the cavitation in the pilot stage of flapper-nozzle hydraulic servovalve with fluid-structure interaction. *IET Conference Publications*. 2018:783–786. doi: 10.1049/cp.2018.0106
14. Bai F, Saalbach K, Wang L, et al. Investigation of impact loads caused by ultrasonic cavitation bubbles in small gaps // *IEEE Access*. 2018;6:64622–64629. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2877799
15. Tkachuk V, Navas H, Petrov A, et al. Hydrodynamic modelling of the impact of viscosity on the characteristics of a centrifugal pump. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;589(1):012007. doi: 10.1088/1757-899X/589/1/012007
16. Morozova E, Belov N, Cheremushkin V. Optimization of the radial channel of a centrifugal pump. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;589(1):012008. doi: 10.1088/1757-899X/589/1/012008
17. Martynyuk O, Petrov A. Optimization of the flow part of the pump for abrasive-containing liquids by hydrodynamic modeling methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;963(1):012005. doi: 10.1088/1757-899X/963/1/012005
18. Isaev N, Valiev T, Morozova E, et al. Optimization of a radial guide device with a no-vane transfer channel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;589(1):012009. doi: 10.1088/1757-899X/589/1/012009
19. Boyarshinova A, Lomakin V, Petrov A. Comparison of various simulation methods of a two-phase flow in a multiphase pump. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;589(1):012028. doi: 10.1088/1757-899X/589/1/012014
20. Saprykina M, Lomakin V. The evaluation of the effect of gas content on the characteristics of a Centrifugal Pump. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;589(1):012017. doi: 10.1088/1757-899X/589/1/012017
21. Protopopov A, Bondareva D. On the issue of starting-up overheating of electric motors of centrifugal pumps. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;492(1):012002. doi: 10.1088/1757-899X/492/1/012002
22. Petrov AI, Protopopov AA. *Cavitation tests of a centrifugal pump: textbook*. Moscow: Izd-vo MG TU im NE Baumana; 2022.

ОБ АВТОРАХ

* Протопопов Александр Андреевич,

канд. физ.-мат. наук,
доцент кафедры «Гидромеханика, гидромашины
и гидропневмоавтоматика»;
адрес: Российская Федерация, 105005, Москва,
2-я Бауманская ул., д. 5, корп. 1;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6069-7730>;
eLibrary SPIN: 4175-5118;
e-mail: proforg6@yandex.ru

Коньшин Дмитрий Сергеевич,

магистр,
специалист;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3744-1224>;
e-mail: konmitya@yandex.ru

Конькеев Евгений Максимович,

магистр,
специалист;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4518-8783>;
e-mail: evgeniikonkeev@gmail.com

Петров Алексей Игоревич,

канд. техн. наук,
доцент кафедры «Гидромеханика, гидромашины
и гидропневмоавтоматика»;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8048-8170>;
eLibrary SPIN: 7172-0320;
e-mail: alex_i_petrov@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку

AUTHORS' INFO

* Alexander A. Protopopov,

Cand. Sci. (Phys.-Math.),
Associate Professor of the Hydromechanics, Hydromachines
and Hydro-Pneumoautomatics Department;
address: 5, Bldg 1, 2nd Baumanskaya street, 105005 Moscow,
Russian Federation;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6069-7730>;
eLibrary SPIN: 4175-5118;
e-mail: proforg6@yandex.ru

Dmitry S. Konshin,

Master,
Specialist;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3744-1224>;
e-mail: konmitya@yandex.ru

Evgenii M. Konkeev,

Master,
Specialist;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4518-8783>;
e-mail: konmitya@yandex.ru

Aleksey I. Petrov,

Cand. Sci. (Tech.),
Associate Professor of the Hydromechanics, Hydromachines
and Hydro-Pneumoautomatics Department;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8048-8170>;
eLibrary SPIN: 7172-0320;
e-mail: alex_i_petrov@mail.ru

* Corresponding author