

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-632427>

Оригинальное исследование



Автоматизированное проектирование 3D-моделей элементов проточной части ступени шнеко-центробежного насоса

А.А. Стасеев, А.А. Жарковский

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В статье приведены результаты разработки программного комплекса для автоматизированного проектирования 3D-моделей элементов проточной части шнеко-центробежного насоса. Разработка подобного программного обеспечения позволяет выполнять процесс проектирования в рамках единого интерфейса, сокращая трудозатраты на эксплуатацию разрозненных пакетов приложений. Предлагается альтернативная методика автоматизации создания трёхмерных моделей без использования параметризованных эскизов.

Цель — разработка программного комплекса, позволяющего вести сквозной процесс проектирования, начиная с ввода технического задания и заканчивая передачей сформированной 3D-геометрии в системы автоматизации инженерных расчётов (CAE).

Методы. Проектирование ступени шнеко-центробежного насоса основано на методиках, используемых в насосостроении. Написание программного кода подчинено принципам структурного программирования. Программное обеспечение реализовано на языке программирования Python с включением legacy-кода, написанного на Fortran. В качестве примера функционирования программного комплекса спроектирована ступень шнеко-центробежного насоса на напор 62.5 м.

Результаты. На настоящий момент в программный комплекс включены модули: расчёт параметров и формирование 2D-эскиза и 3D-модели шнека, расчёт основных параметров рабочего колеса, проектирование меридианного сечения и расчёт равнораспределённого потока, расчёт параметров кромок, проектирование лопастной системы, расчёт потерь в рабочем колесе на основе расчёта 2-х мерного невязкого течения, пространственного пограничного слоя и низкоэнергетического следа в каналах рабочего колеса, автоматическое создание 3D-модели рабочего колеса, проектирование спирального отвода и расчёт потерь в нем, формирование 3D-модели спирального отвода, расчёт прогнозной характеристики, формирование 3D-модели ступени с помощью программного интерфейса приложения (API) системы автоматизированного проектирования (CAD) Компас-3D. Сгенерированная 3D-геометрия проточной части была использована для выполнения гидродинамического расчёта.

Заключение. Результаты проведённого гидродинамического расчёта имеют малое расхождение с результатами расчётов, проведённых с помощью разработанного программного обеспечения. Планируется дальнейшее развитие программного комплекса в части автоматизированной интеграции 3D-геометрии в современные CAE-системы, которые позволят оптимизировать полученные ступени шнеко-центробежных насосов.

Ключевые слова: автоматизация проектирования; шнеко-центробежный насос; спиральный отвод; шнек; рабочее колесо; python; Компас-3D; Компас Макро.

Как цитировать:

Стасеев А.А., Жарковский А.А. Автоматизированное проектирование 3D-моделей элементов проточной части ступени шнеко-центробежного насоса // Известия МГТУ «МАМИ». 2024. Т. 18, № 3. С. 212–221. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-632427>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-632427>

Original Study Article

Automated design of the 3D models of the elements of the flow part of the stage of a screw-centrifugal pump

Alexander A. Staseev, Alexander A. Zharkovsky

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: The paper presents the results of the development of a software package for automated design of 3D models of elements of the flowing part of a screw-centrifugal pump. The development of such software makes the design process possible within a single interface, reducing labor costs for the operation of disparate software packages. An alternative method of automating the creation of 3D models without the use of parameterized sketches is proposed.

AIM: Development of a software system that is capable of performing the end-to-end design process, starting from the input of the technical specification and ending with the export of the generated 3D geometry to computer-aided engineering (CAE) systems.

METHODS: The design of the stage of a screw-centrifugal pump is based on the methods used in pump engineering. Writing the program code is subordinated to the principles of structural programming. The software is implemented using the Python programming language with inclusion of the legacy-code written in the FORTRAN. As an example of functioning of the software package, the stage of a screw centrifugal pump at a head of 62.5 m is designed.

RESULTS: Currently, the software package includes such modules as: calculation of parameters and formation of the 2D sketch and the 3D model of the screw, calculation of basic parameters of the impeller; design of the meridian cross-section and calculation of equal velocity flow; calculation of edge parameters; design of the vane system; calculation of losses in the impeller on the basis of calculation of 2-dimensional non-viscous flow, spatial boundary layer and low-energy trace in the impeller channels; automatic creation of the 3D model of the impeller; design of the spiral outlet; calculation of the prediction characteristics; generation of the 3D model of the stage using the application programming interface (API) of the Kompas-3D computer-aided design (CAD) system. The generated 3D geometry of the flow section was used to perform the hydrodynamic calculation.

CONCLUSION: The results of the performed hydrodynamic calculation have a small discrepancy with the results of the calculations performed with the developed software. Further development of the software system is planned in terms of automated integration of the 3D geometry into modern CAE-systems, which will help to optimize the obtained stages of screw-centrifugal pumps.

Keywords: design automation; screw-centrifugal pump; spiral outlet; screw; impeller; Python; Kompas-3D; Kompas Macro.

To cite this article:

Staseev AA., Zharkovsky AA. Automated design of the 3D models of the elements of the flow part of the stage of a screw-centrifugal pump. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2024;18(3):212–221. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-632427>

Received: 28.05.2024

Accepted: 28.11.2024

Published online: 28.11.2024

ВВЕДЕНИЕ

С развитием мощностей вычислительной техники и эволюцией программного обеспечения всё большее распространение получают системы автоматизированного проектирования [1–5], предназначенные для упрощения и ускорения процесса модернизации существующих конструкций и разработки новых конструкторских решений. Данный тренд затронул и сферу насосостроения [6]. На данный момент для процессов проектирования и расчёта элементов проточных частей шнеко-центробежных насосов используется специализированное программное обеспечение, работа в котором ведётся обособленно, что вызывает ряд проблем: передача данных из одного программного обеспечения в другое требует соответствующей подготовки исходных данных, т. е. трансфер между отдельными программами занимает время, отсутствует единый интерфейс, с помощью которого можно обращаться к разным этапам процесса проектирования в рамках одной программы, отсутствует автоматическая каталогизация полученных данных. Описанный ряд проблем ведёт к повышению трудоёмкости процесса проектирования проточной части шнеко-центробежных ступеней насосов, а также может вызывать различные ошибки, возникающие при трансфере данных из одного программного обеспечения в другое. Оптимальной формой ведения процесса проектирования, позволяющей уменьшить негативное влияние вышеописанных проблем, является разработка программного комплекса, позволяющего пользователю взаимодействовать с обособленным программным обеспечением в рамках одного интерфейса, с унифицированной базой данных. На настоящий момент существуют разработки, позволяющие автоматизировать процесс проектирования проточных частей насосов [7–9], однако в большинстве случаев программное обеспечение

базируется на предварительно созданной параметрической геометрии, изменение параметров которой происходит непосредственно в CAD/CAE-системах, где была создана модель. В качестве модулей, формирующих связь между файлами, содержащими геометрические данные и CAD-системами используются макросы, запускаемые непосредственно в программах, предназначенных для создания 3D-моделей. Перечень данных фактов существенно снижает гибкость существующего программного обеспечения, затрудняя доступ к другим программам и усложняя настройку трансфера данных между ними.

Целью данной статьи является описание разработанного программного обеспечения, использующего альтернативный подход к автоматизированному проектированию 3D-моделей проточной части ступени шнеко-центробежного насоса, основой которого является создание геометрии без использования предварительно созданных параметризованных моделей. В программном обеспечении реализованы внешние вызов и управление функционалом CAD-системы «Компас 3D» с последующей интеграцией полученной геометрии в собственный продукт, что обеспечивает возможность выполнения расчёта геометрических параметров и построение 3D-модели в едином интерфейсе.

АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Для примера разбирается расчёт шнеко-центробежной ступени на заданные по ТЗ (техническому заданию) параметры (рис. 1). Расчёт элементов проточной части выполняется последовательно, начиная от шнека и заканчивая тангенциальным выходным диффузором спирального отвода.

Для уменьшения количества возможных ошибок при создании программного обеспечения используется

Данные проекта		Техническое задание	
Исходные данные			
Расход через насос ($\text{м}^3/\text{с}$)	0.175		
Напора насоса (м)	62.5		
Частота вращения (об/мин)	1480.0		
Требуемый КПД	0		
Доп. кав. запас (м)	2.9		
Число потоков (шт.)	1.0		
Число ступеней (шт.)	1.0		
Тип РК		Расположение РК на валу	
<input type="radio"/> Центробежное		<input type="radio"/> Без втулки	
<input checked="" type="radio"/> Шнеко-центробежное		<input checked="" type="radio"/> Со втулкой	
Рабочая среда			
Наименование			
Температура ($^{\circ}\text{C}$)		136.0	
Плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$)		930.0	
Коэффициент вязкости ($\text{м}^2/\text{с}$)		2.17e-07	
Кавитационные качества			
<input checked="" type="radio"/> Обычные <input type="radio"/> Повышенные			
Тип отвода		Тип подвода	
<input checked="" type="radio"/> Спиральный		<input checked="" type="radio"/> Осевой	
<input type="radio"/> Канальный		<input type="radio"/> Боковой	
<input type="radio"/> Лопаточный		<input type="radio"/> Канальный	
OK		Отмена	

Рис. 1. Ввод технического задания.

Fig. 1. The technical task input.

модульная архитектура. Упрощённая структура программного обеспечения представлена на рис. 2.

Каждый из модулей состоит из множества подмодулей, отвечающих за каждый этап проектирования конкретного элемента проточной части. Функционирование каждого модуля представляет собой последовательное выполнение подмодулей. Обмен данными между подмодулями выполняется с использованием внешних файлов.

МОДУЛЬ «ШНЕК»

Процесс проектирования начинается с модуля «Шнек». Входные параметры для проектирования шнека задаются согласно рекомендациям работы [10]. При задании гидравлического КПД шнека использованы два подхода: по рекомендациям Руднева С.С. [10], по мнению которого КПД шнека находится в диапазоне 0,45–0,55, и по полуэмпирической формуле Боровского Б.И. [11]:

$$\eta_r = 0,9 \cdot \tanh \left(\left(\frac{110}{KDsh^3} \right)^{0,55} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{\tau_{cp}}} - 0,1 \right) \right). \quad (1)$$

По умолчанию гидравлический КПД шнека полагается равным 0,5.

Последовательность вызова подмодулей для расчёта энергетических и геометрических параметров шнека выполняется по алгоритму, представленному на рис. 3.

В интерфейсе разработанного программного обеспечения есть возможность вывести геометрию шнека либо в виде 2D-эскиза (рис. 4, а), либо в 3D-модели (рис. 4, б). Автоматизация построения 3D-модели выполнена с помощью API CAD-системы КОМПАС-3D [12]. При записи макроса было выявлено, что создание массива лопастей шнека сопряжено с определёнными сложностями, поэтому процесс создания лопастей включён в цикл, ограниченный по количеству лопастей.

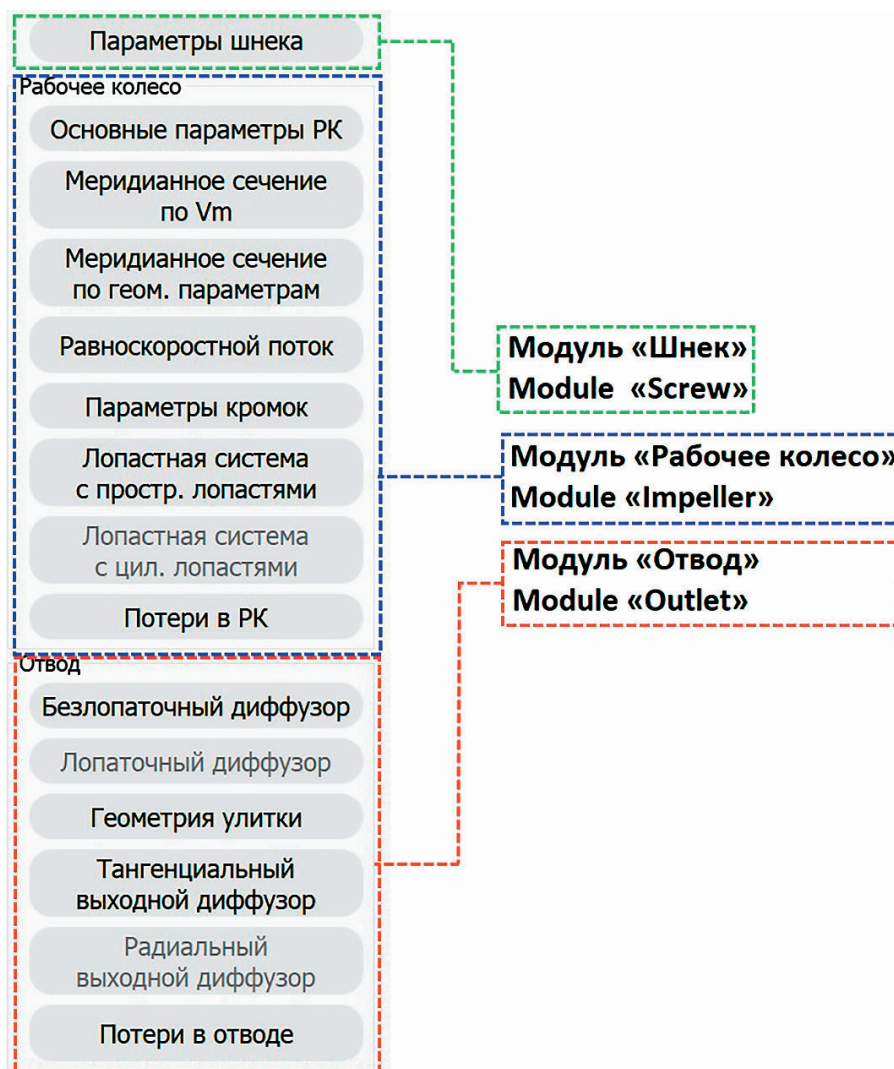


Рис. 2. Архитектура разработанного программного обеспечения.

Fig. 2. Architecture of the developed software.

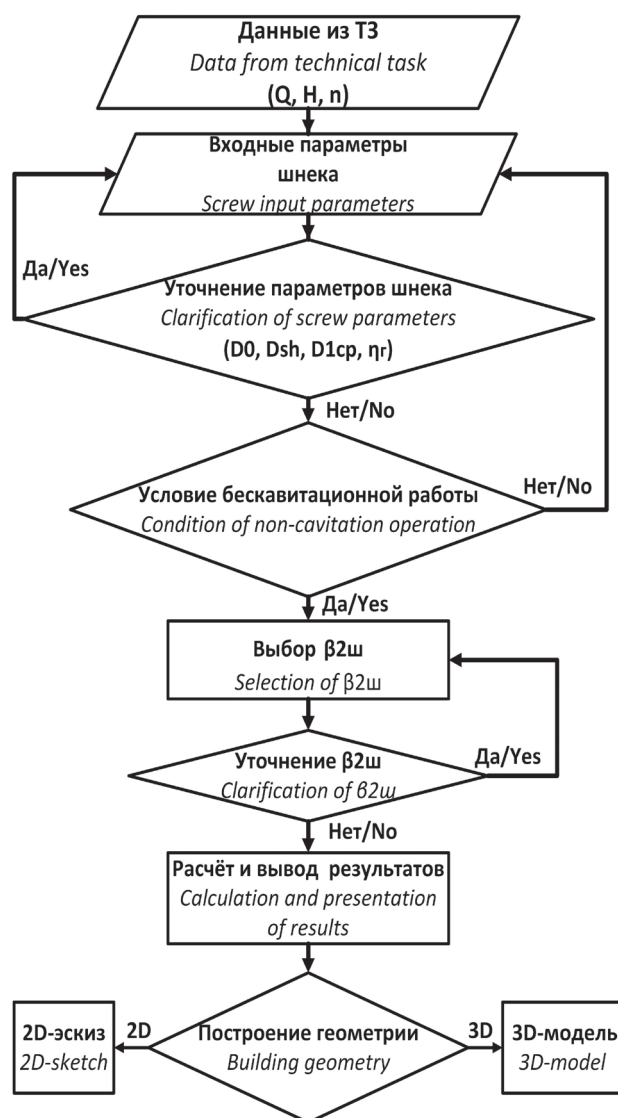


Рис. 3. Алгоритм проектирования шнека: Q — подача ступени, $\text{м}^3/\text{с}$; H — напор ступени, м ; n — частота вращения, $\text{об}/\text{мин}$; D_0 — диаметр входа в рабочее колесо, м ; D_{sh} — наружный диаметр шнека, м ; D_{1cp} — средний диаметр шнека, м ; η_r — гидравлический КПД шнека; $\beta_{2ш}$ — угол выхода относительного потока за шнеком на расчётном диаметре, град.

Fig. 3. The screw design algorithm: Q — stage flow rate, m^3/s ; H — stage head, m ; n — rotational speed, rpm ; D_0 — diameter of entrance to the impeller, m ; D_{sh} — outer diameter of screw, m ; D_{1cp} — average screw diameter, m ; η_r — hydraulic efficiency of screw; $\beta_{2ш}$ — angle of exit of relative flow behind the screw at the design diameter, deg .

МОДУЛЬ «РАБОЧЕЕ КОЛЕСО»

Последовательность вызова подмодулей по проектированию рабочего колеса приведена на рис. 5. Аналогично модулю «Шнек» в начале процесса проектирования есть возможность ввести предварительные геометрические параметры, на основании которых будут выполняться расчёты энергетических и геометрических параметров. В случае, если расчёт проводится

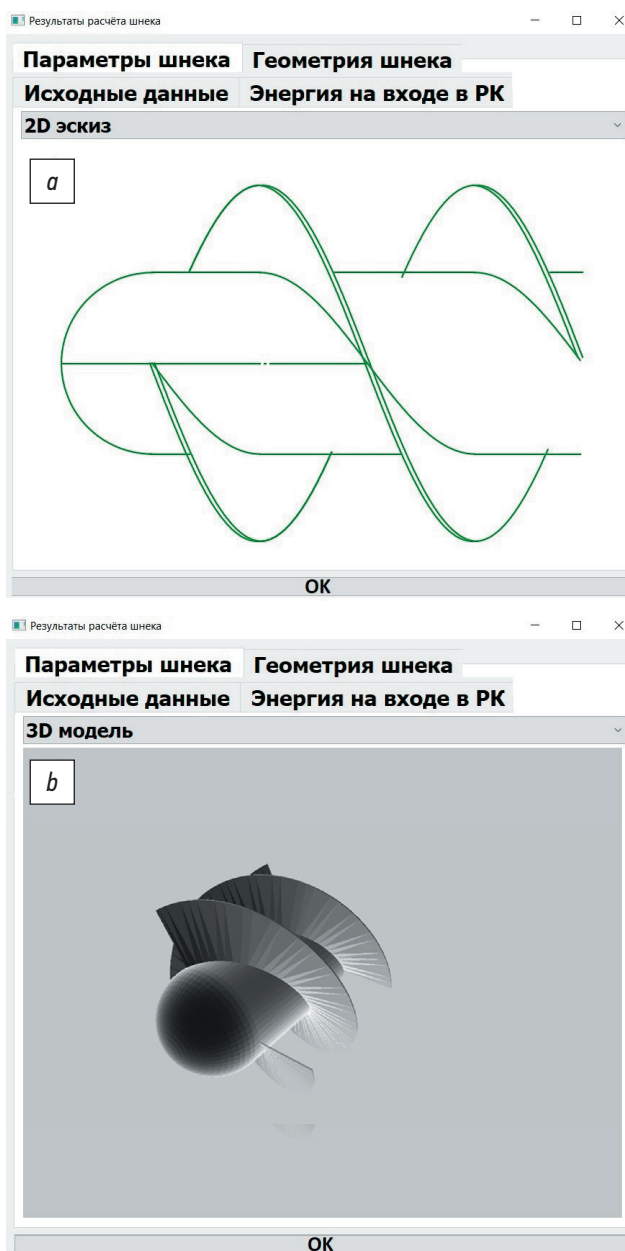


Рис. 4. Визуализация построения геометрии шнека: a — 2D-эскиз; b — 3D-модель.

Fig. 4. Visualization of the screw geometry generation: a — a 2D sketch; b — a 3D model.

без предварительного задания геометрических параметров, программный комплекс назначит входные данные самостоятельно на основании рекомендаций, изложенных в [13–14].

В процессе расчёта основных параметров рабочего колеса существует возможность корректировать значения следующих величин: гидравлический, объёмный и механический КПД, диаметр рабочего колеса. При необходимости можно выполнить повторный расчёт

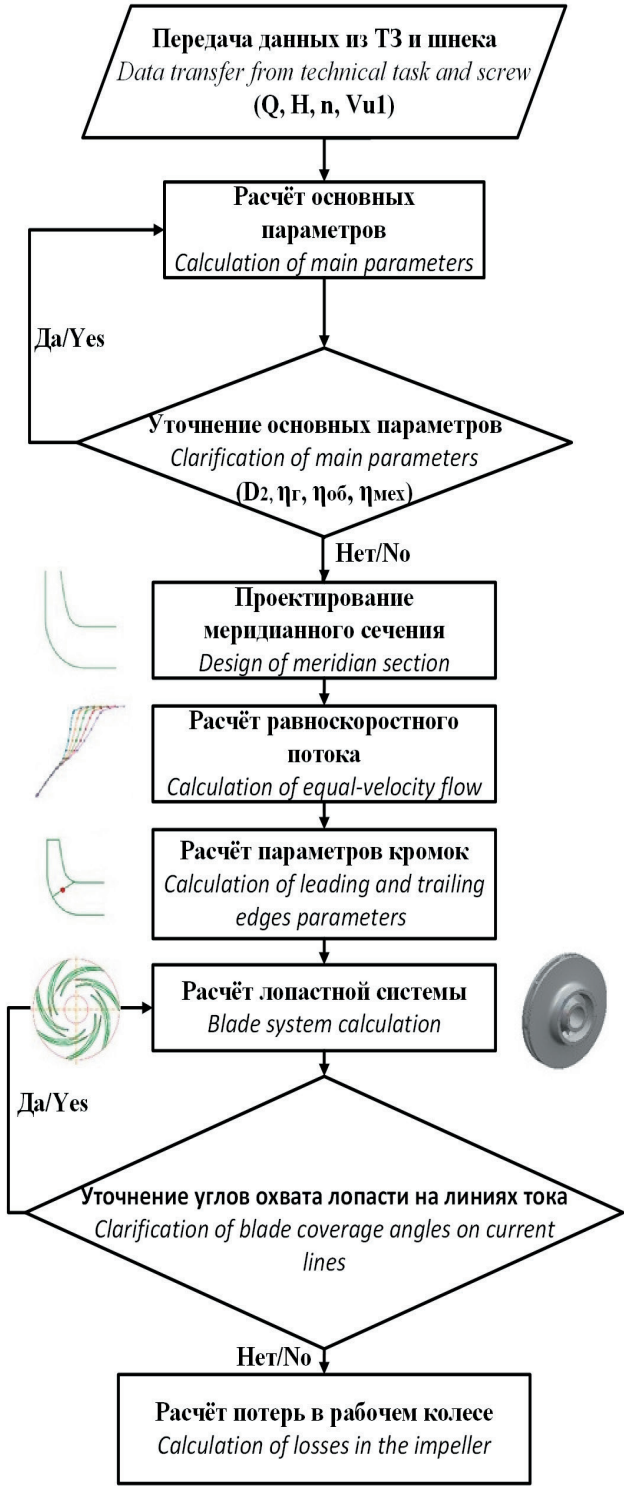


Рис. 5. Алгоритм проектирования рабочего колеса: Q — подача ступени, м³/с; H — напор ступени, м; n — частота вращения, об/мин; Vu1 — закрутка потока на входе в рабочее колесо, м/с; D2 — наружный диаметр рабочего колеса; ηг — гидравлический КПД рабочего колеса; ηоб — объёмный КПД рабочего колеса; ηмех — механический КПД рабочего колеса.

Fig. 5. The impeller design algorithm: Q — flow rate of the stage, m³/s; H — head of the stage, m; n — rotational speed, r/min; Vu1 — swirl of the flow at the inlet of the impeller, m/s; D2 — outer diameter of the impeller; ηг — hydraulic efficiency of the impeller; ηоб — volumetric efficiency of the impeller; ηмех — mechanical efficiency of the impeller.

со скорректированными значениями. Проектирование меридианного сечения и расчёт равноскоростного потока выполняется полностью в автоматическом режиме и не требует действий со стороны пользователя.

Подмодуль, ответственный за проектирование лопастной системы, выполняет построение пространственной лопасти, обладающей более общей формой по сравнению с цилиндрической лопастью.

После завершения процесса проектирования появляется окно с визуализацией полученной лопастной системы. Существует возможность переключить отображение с 2D-эскиза (рис. 6, а) к полноценной 3D-модели (рис. 6, б), отображение которой интегрировано в интерфейс разработанного программного комплекса. Для подобной визуализации модель, построенная с помощью



Рис. 6. Визуализация лопастной системы: а — 2D-эскиз; б — 3D-модель.

Fig. 6. The vane system visualization: а — a 2D sketch; б — a 3D model.

API «Компас-3D», конвертируется в фасетное тело. Полученный файл с фасетным телом используется совместно с библиотекой PyOpenGL [15].

Стоит отметить, что аналогично модулю, ответственному за построение 3D-модели шнека, существуют сложности с созданием круговых массивов, что обуславливает необходимость создания цикла для построения лопастной системы, что в свою очередь снижает быстродействие разработанного программного комплекса.

МОДУЛЬ «ОТВОД»

Алгоритм вызова подмодулей для проектирования отвода представлен на рис. 7.

В настоящее время реализован алгоритм построения 3D-моделей отводов, состоящих из следующих элементов: безлопаточный диффузор, спиральная часть и выходной тангенциальный диффузор. Спиральная часть отвода формируется с помощью цикла, в котором создаются все рассчитанные сечения в качестве эскизов. На основании полученных эскизов производится построение твёрдого тела.

По завершении проектирования ступени шнеко-центробежного насоса есть возможность просмотреть

все сгенерированные 3D-модели в отдельном окне (рис. 8, *a, b, c*), а также выполнить объединение всех смоделированных элементов в проточной части ступени (рис. 8, *d*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан программный комплекс для автоматизированного проектирования ступени шнеко-центробежного насоса. Разработанное программное обеспечение включает модули по проектированию элементов проточной части ступени шнеко-центробежного насоса и формированию 3D-модели элементов проточной части. Полученная 3D-геометрия проточной части была использована для выполнения гидродинамического расчёта в пакете Ansys CFX. По результатам 3D-расчётов были получены следующие интегральные параметры ступени: напор — 63,5 метра, полный КПД — 79%. Результаты 3D гидродинамического расчёта имеют малое расхождение с результатами 2D-расчётов по разработанному программному комплексу. Дальнейшим развитием функциональных возможностей программного комплекса будет расчёт ступеней центробежных насосов с лопаточными отводами.



Рис. 7. Алгоритм проектирования спирального отвода.

Fig. 7. The spiral outlet design algorithm.

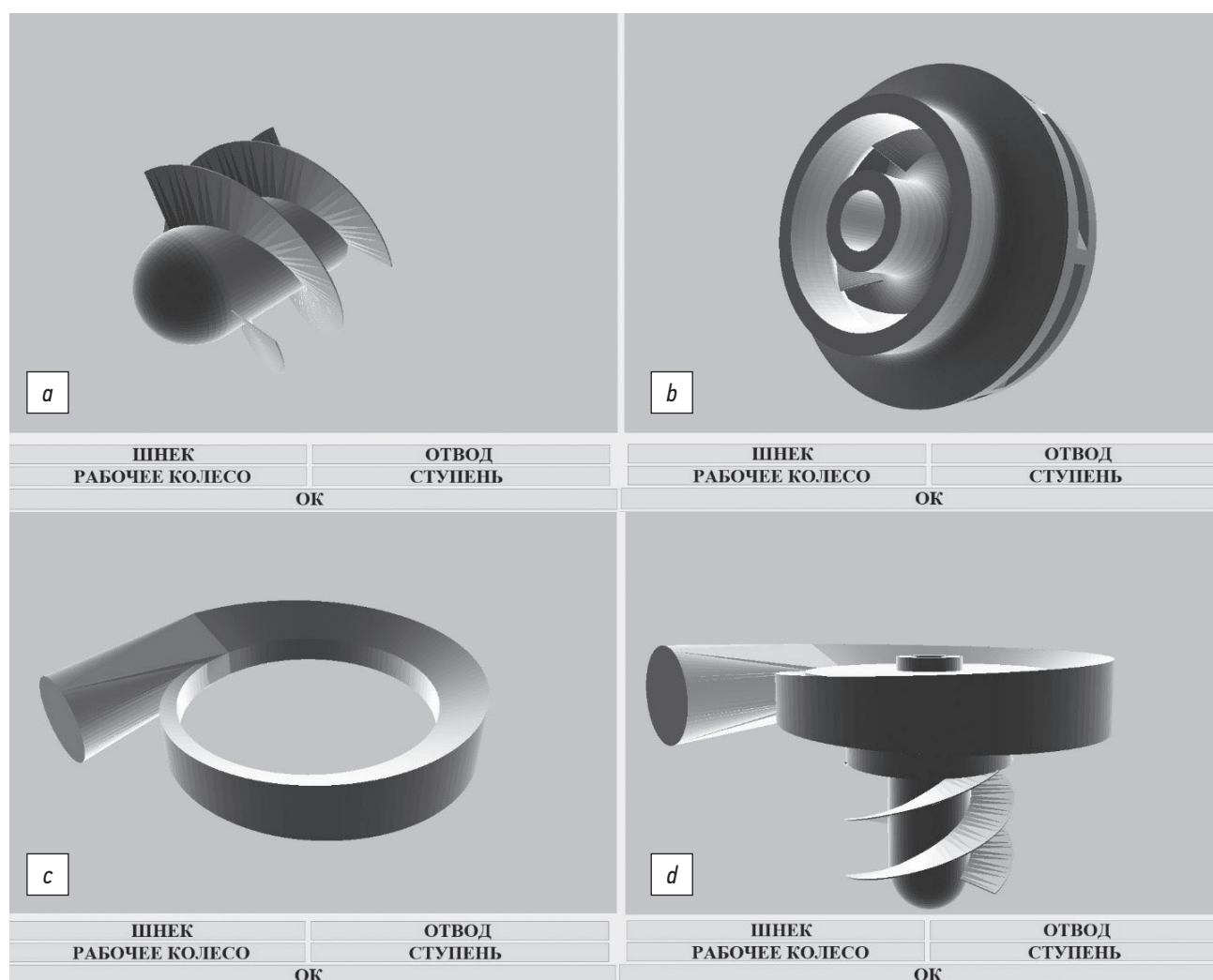


Рис. 8. 3D-модели элементов проточной части: *a* — 3D-модель шнека; *b* — 3D-модель рабочего колеса; *c* — 3D-модель спирального отвода; *d* — 3D-модель ступени.

Fig. 8. 3D models of the flow section elements: *a* — a 3D model of the screw; *b* — a 3D model of the impeller; *c* — a 3D model of the spiral outlet; *d* — a 3D model of the stage.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. А.А. Стасеев — написание программного кода на языке Python, написание текста статьи, сбор и анализ литературных источников; А.А. Жарковский — написание программного кода на языке Fortran, редактирование текста статьи. Все 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 проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. A.A. Staseev — writing program code in Python, writing the text of the manuscript, collecting and analyzing literary sources; A.A. Zharkovsky — writing program code in Fortran, editing the text of the manuscript. Authors confirm the compliance of their authorship with the ICMJE international criteria. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ma H.C., Wang K., Zhou X.H. Software development of hydraulic design for pump suction chambers // *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vol. 212. P. 1191–1196. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.212-213.1191
2. Галдин Д.Н., Печкуров С.В. Построение параметрической модели проточной части центробежного насоса для выполнения автоматизированного преобразования геометрии. В кн.: Разработка, производство и эксплуатация турбо-, электронасосных агрегатов и систем на их основе. Труды X Международной научно-технической конференции. Воронеж: Научная книга, 2019. С. 8–16.
3. Бубнов В.П., Султонов Ш.Х. Применение систем автоматизированного проектирования в машиностроении // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. 2017. №. 1. С. 48–51.
4. Chmielniak T., Stojanovic N. Design of Computer Aided Design in the Field of Mechanical Engineering // *Acta Energetica*. 2022. №. 1. С. 8–16.
5. Brockmüller T., Siqueira R., Gembarski P.C., et al. Computer-Aided Engineering Environment for Designing Tailored Forming Components // *Metals*. 2020. T. 10, №. 12. doi: 10.3390/met10121589
6. Голиков В.А., Жарковский А.А., Топаж Г.И. Программные комплексы для расчета течения и автоматизированного проектирования лопастных гидромашин // *Материаловедение. Энергетика*. 2012. №. 1 (142). С. 199–206.
7. Ломакин В.О., Щербачев П.В., Тарасов О.И., и др. Создание параметризованных 3D-моделей проточной части центробежных насосов // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2012. №. 04. С. 1–10.
8. Kostornoy S., Chaplygin A., Kostornoy A. Automatized Design of the Centrifugal Pumps Setting on the Base of Mathematic Modeling of Fluid Flow // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 39. С. 212–222. doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.027
9. Pansare R., Palsodkar M. Agility through design automation: A study on centrifugal pump design. In: 2017 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE). IEEE, 2017. doi: 10.1109/ICNTE.2017.7947921
10. Руднев С.С., Байбаков О.В., Матвеев И.В., Мелашенко В.И. Методическое пособие по расчёту шнеко-центробежной ступени насоса. М.: М-во высш. и сред. спец. образования СССР. Моск. высш. техн. училище им. Н. Э. Баумана, 1974.
11. Боровский Б.И. Энергетические параметры и характеристики высоконапорных лопастных насосов. М.: Машиностроение, 1989.
12. Руководство пользователя КОМПАС-Invisible (API КОМПАС-3D). Дата обращения: 21.03.2024. Режим доступа: <https://kompas.ru/source/documents/2021/%D0%A0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%20KOMPAS-Invisible.pdf>
13. Ломакин А.А. Центробежные и осевые насосы. М.: Машиностроение, 1965.
14. Пфлейдерер К. Центробежные и пропеллерные насосы. М.: ОНТИ МХТИ СССР, 1937.
15. PyOpenGL 3.x The Python OpenGL Binding. Дата обращения: 22.05.2024. Режим доступа: <https://pyopengl.sourceforge.net/>

REFERENCES

1. Ma HC, Wang K, Zhou XH. Software development of hydraulic design for pump suction chambers. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;212:1191–1196. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.212-213.1191
2. Galdin DN, Pechkurov SV. Construction of the parametric model of the flow part of the centrifugal pump to perform the automated geometry transformation. In: *Development, production and operation of turbo-, electric pump units and systems based on them. Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference*. Voronezh: Nauchnaya kniga; 2019:8–16. (In Russ.)
3. Bubnov VP, Sultonov ShH. Application of computer-aided design systems in mechanical engineering. *Intellektual'ny'e tekhnologii na transporte*. 2017;1:48–51. (In Russ.)
4. Chmielniak T, Stojanovic N. Design of Computer Aided Design in the Field of Mechanical Engineering. *Acta Energetica*. 2022;01:08–16.
5. Brockmüller T., et al. Computer-Aided Engineering Environment for Designing Tailored Forming Components. *Metals*. 2020;10(12). doi: 10.3390/met10121589
6. Golikov VA, Zharkovskiy AA, Topazh GI. Program complexes for the flow calculation and automated design of the vane hydraulic machines. *Materialovedenie. E`nergetika*. 2012;1(142):199–206. (In Russ.)
7. Lomakin VO, Shcherbachev PV, Tarasov OI, et al. Creation of parameterized 3D-models of centrifugal pumps flow part. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii*. 2012;04:7. (In Russ.)
8. Kostornoy S, Chaplygin A, Kostornoy A. Automatized Design of the Centrifugal Pumps Setting on the Base of Mathematic Modeling of Fluid Flow. *Procedia Engineering*. 2012;39:212–222. doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.027
9. Pansare R, Palsodkar M. Agility through design automation: A study on centrifugal pump design. In: *2017 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*. IEEE. 2017:1–8. doi: 10.1109/ICNTE.2017.7947921
10. Rudnev SS, Baibakov OV, Matveev IV, Melashchenko VI. *Methodical manual for calculation of the screw-centrifugal pump stage*. Moscow: M-vo vyssh. i sred. spets. obrazovaniya SSSR. Mosk. vyssh. tekhn. uchilishche im. N. E. Bauman; 1974. (In Russ.)
11. Borovskiy BI. *Energy parameters and characteristics of high-pressure vane pumps*. Moscow: Mashinostroenie. 1989. (In Russ.)
12. KOMPAS-Invisible User's Guide (API KOMPAS-3D). Accessed: 22.05.2024. Available from: <https://kompas.ru/source/documents/2021/%D0%A0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%20KOMPAS-Invisible.pdf>
13. Lomakin AA. *Centrifugal and axial pumps*. Moscow: Mashinostroenie; 1965. (In Russ.)
14. Pfleiderer K. Centrifugal and propeller pumps. Moscow: ONTI MKhTI SSSR, 1937. (In Russ.)
15. PyOpenGL 3.x The Python OpenGL Binding. Accessed: 22.05.2024. Available from: <https://pyopengl.sourceforge.net/>

ОБ АВТОРАХ

*** Стасеев Александр Александрович,**

аспирант Высшей школы энергетического машиностроения;
адрес: Российская Федерация, 195251, Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, д. 29;
ORCID: 0000-0002-4851-804X;
eLibrary SPIN: 4777-3813;
e-mail: greenalh@gmail.com

Жарковский Александр Аркадьевич,

д-р техн. наук, профессор,
профессор Высшей школы энергетического машиностроения;
ORCID: 0000-0002-3044-8768;
eLibrary SPIN: 3637-7853;
e-mail: azharkovsky@gmail.com

AUTHORS' INFO

*** Aleksandr A. Staseev,**

Postgraduate of the Higher School of Power Engineering;
address: 29 Polytekhnicheskaya street, 195251 Saint Petersburg,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-4851-804X;
eLibrary SPIN: 4777-3813;
e-mail: greenalh@gmail.com

Alexander A. Zharkovsky,

Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Professor of the Higher School of Power Engineering;
ORCID: 0000-0002-3044-8768;
eLibrary SPIN: 3637-7853;
e-mail: azharkovsky@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author