



Определение гидродинамических и виброакустических характеристик запорного клапана методом гибридного инжиниринга

Т. Г. Чистякова

ведущий специалист;
Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет, г. Санкт-Петербург;
tg.chist@gmail.com

Е. А. Куличкова

кандидат технических наук;
заместитель генерального директора по науке;
АО «Армалит», г. Санкт-Петербург;
elenakulichkova@mail.ru

Новые технологии являются значимым фактором повышения эффективности деятельности промышленных предприятий. Традиционные способы проектирования не позволяют закрыть потребности в технологическом оборудовании. Перспективным направлением является гибридный инжиниринг, объединяющий физические и виртуальные подходы в единый процесс. Основой данного подхода является обратный инжиниринг и численное моделирование. В статье на примере создания невозвратно-запорного клапана рассматривается реализация гибридного инжиниринга. Приведены результаты лазерного сканирования деталей, сформулированы преимущества и недостатки. Приведены результаты гибридного подхода к численному моделированию для прогнозирования уровней шума. Выявлена необходимость дальнейших исследований для накопления практического опыта, достоверной статистической информации, результатов верификации и валидации, базы знаний. Подтверждено, что гибридные подходы являются наиболее перспективными для ускоренного проектирования и прогнозирования характеристик, позволяют уже на начальном этапе выявить недостатки конструкции, и в случае необходимости произвести оптимизацию с целью достижения заданных требований.

Ключевые слова: технология проектирования; методы численного моделирования; лазерное сканирование; виброакустические характеристики

Цитирование: Чистякова, Т. Г. Определение гидродинамических и виброакустических характеристик запорного клапана методом гибридного инжиниринга / Т. Г. Чистякова, Е. А. Куличкова // Динамика и виброакустика. – 2024. – Т. 10, №4. – С. 33–42. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-4-33-42

Введение

В последние несколько лет отечественная промышленность находится в условиях технической потребности и в то же время больших возможностей развития технологий и адаптации подходов к проектированию оборудования. Чем быстрее будет создано оборудование и подтверждены его свойства и характеристики, тем более интенсивным будет технологическое развитие различных отраслей промышленности. Ускорение проектирования инноваци-

онной продукции в рамках традиционной системы последовательной разработки не всегда возможно. В свою очередь обратный инжиниринг направлен на анализ уже существующего изделия, что позволяет понять конструктивные особенности для его воспроизведения, модернизации или интеграции в новые разработки и ускорить процесс проектирования.

Обратный инжиниринг успешно внедряется в практику инновационной деятельности передовых отечественных предприятий. В судостроительной отрасли метод применяется для создания 3D моделей изделий судовых машиностроительных частей (МСЧ) [1], комплектующих, гребных винтов, корпусов маломерных судов [2]. В компрессорной технике реализован реверс инжиниринг сменной проточной части и детандерного колеса [3], коленчатых валов [4]. Корпусные детали в нефтегазовой и автомобильной промышленности [5], лопатки сошника в сельском хозяйстве [6], ротор газовых счётчиков в энергетике [7] – эти реализованные проекты не только позволяют воссоздать исходное изделие, но и создают задел для дальнейшего совершенствования.

Однако практически во всех приведённых работах наряду с преимуществами использования обратного инжиниринга приведены ограничения. Их анализ позволил обобщить и выделить основные: проблемы при сканировании мелких и труднодоступных конструктивных элементов; трудности работы с изношенными деталями; ограничения возможности полной разборки узлов; сложности определения материалов; ошибки в измерениях или интерпретации результатов сканирования.

Минимизация ограничений возможна при комбинировании обратного инжиниринга с традиционными методами проектирования. Переход к такому комплексному подходу, гибриднему инжинирингу, является необходимостью и позволяет не только значительно сократить сроки вывода на рынок изделий, но и улучшить отдельные эксплуатационные свойства разрабатываемых изделий, такие как долговечность, надёжность, виброакустические характеристики. Гибридный инжиниринг, в частности, позволяет существенно продвинуться в направлении прогнозирования гидродинамических и виброакустических характеристик трубопроводной арматуры. Так, например, лазерное сканирование оборудования позволяет получить геометрию проточной части, а методы численного моделирования дают возможность проанализировать характер потока, прогнозировать и оптимизировать характеристики, и вследствие модернизировать конструкцию [8]. Уровень гидродинамического шума (ГДШ), возникающий при турбулентном течении жидкости, является одним из основных критериев оценки соответствия клапанов предъявляемым требованиям [9], поэтому необходимо на этапе проектирования иметь возможность расчёта данной характеристики. В данной работе также предлагается использовать гибридный подход при расчёте прогнозируемых уровней ГДШ численными методами, основанный на раздельном расчёте генерации шума и его распространения.

Целью исследования является обоснование применения подходов гибридного инжиниринга для проектирования оборудования и прогнозирования его акустических характеристик.

1 Формирование 3D-модели

Для реализации процесса гибридного инжиниринга выбран типовой представитель трубопроводной арматуры – клапан не возвратно-запорный DN100 PN16 бронзовый с фланцевым типом присоединения к трубопроводу (рисунок 1). Клапан является распространённым элементом судовых трубопроводных систем, предназначен для перекрытия и автоматического предотвращения обратного потока рабочей среды.

Для получения данных о внутренней геометрии проточной части клапана использовался 3D сканер Solutionix C500 (рисунок 2). Сканирование позволяет получить облако точек,

массив которых определяет геометрию детали гораздо быстрее, чем при измерении контактными методами.



Рисунок 1 – Клапан невозвратно-запорный



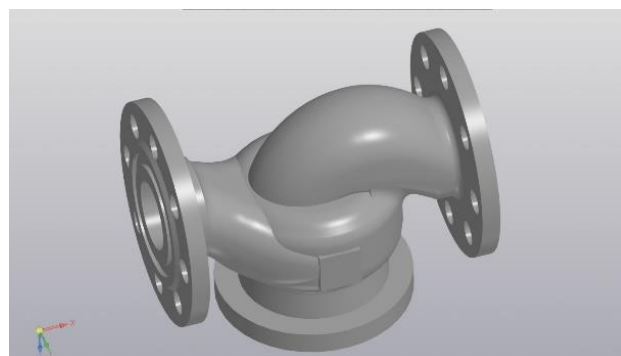
Рисунок 2 – 3D сканер Solutionix C500

Для проведения замеров деталей клапана проведены следующие работы: разборка, нанесение специальных маркеров на сложные криволинейные поверхности исследуемого изделия и обработка антибликовым покрытием глянцевых поверхностей.

В результате сканирования создаётся облако точек, которое затем автоматически преобразовывается в полигональную модель. Для дальнейшей работы полученная полигональная модель передаётся в Компас 3D (рисунок 3, *а* и 3, *б*).



а



б

Рисунок 3 – 3D-модель корпуса клапана: *а* – полигональная; *б* – математическая

Анализируя полученные результаты, можно выделить закономерность, заключающуюся в том, что размеры, пригодные для замеров ручным измерительным инструментом, и те же самые размеры, снятые с изделия сканером, отличаются совсем незначительно. В то время как сложные криволинейные поверхности, недоступные для замера измерительным ин-

струментом, не всегда корректно определяются 3D сканером. Погрешность, возникающая на этапе сканирования, во многом зависит от типа используемого оборудования, условий сканирования и компетенций оператора. Для каждого вида деталей необходимо учитывать эти особенности и формулировать рекомендации.

Также при построении твердотельной модели по полученным после сканирования полигонам часто возникают сложности по сшивке поверхности и технологические коллизии (столкновения твердотельных границ), рисунок 4.

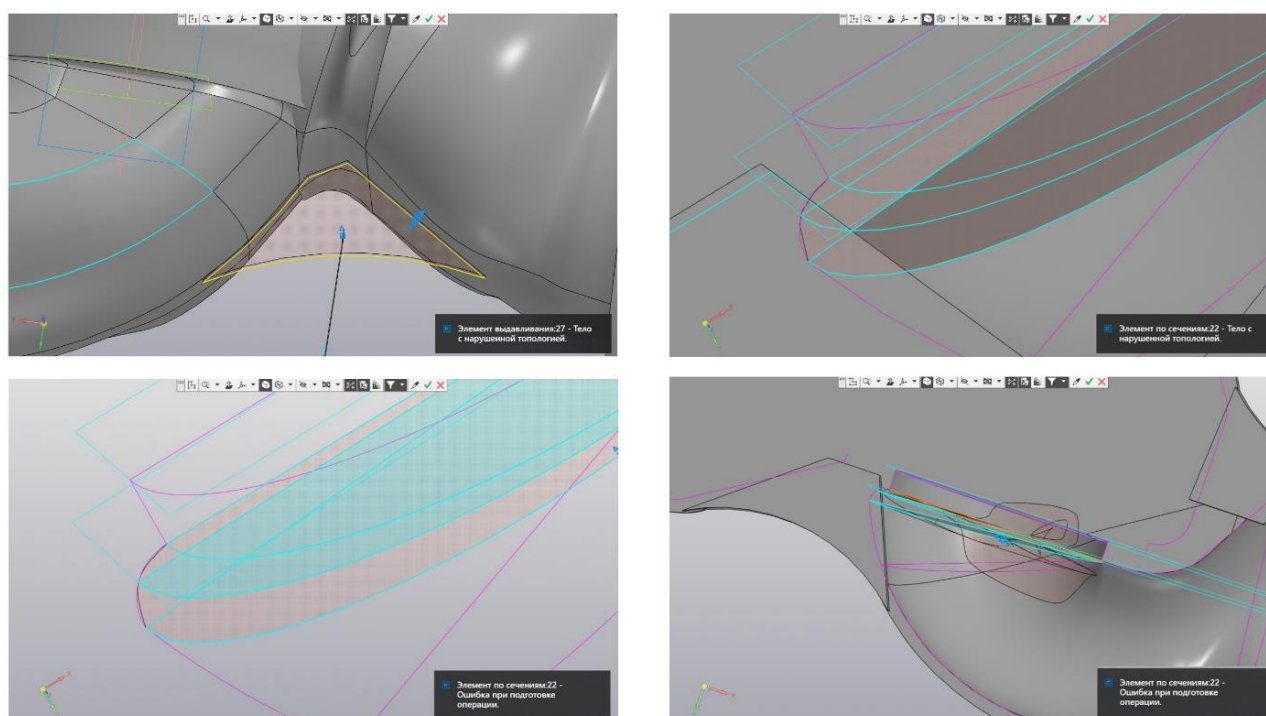


Рисунок 4 – Коллизии при построении твердотельной модели (нарушение топологии и ошибки при подготовке операций)

Правильная электронная модель, с точки зрения поверхности или частей поверхности, должна быть описана математической формулой, например конус, сфера или тор. Такой подход необходим как для проектирования, так и для последующих расчётов методом конечных элементов и численного моделирования. Обратный инжиниринг в таком случае можно применять как процесс извлечения ценных технических данных для дальнейшего анализа и обработки информации.

Стоит также отметить неоспоримое преимущество этой технологии. Она позволяет существенно сократить стадию разработки проектной документации: исключить анализ аналогов и вариантов конструкции, выбор оптимального решения и его обоснование. Иными словами, пропустить наиболее длительную и наукоёмкую стадию технического предложения и детально сосредоточиться на процессе моделирования, модернизации и материального воплощения нового изделия.

В результате сканирования, обработки облака точек и устранения коллизий получена 3D модель клапана (рисунок 5).

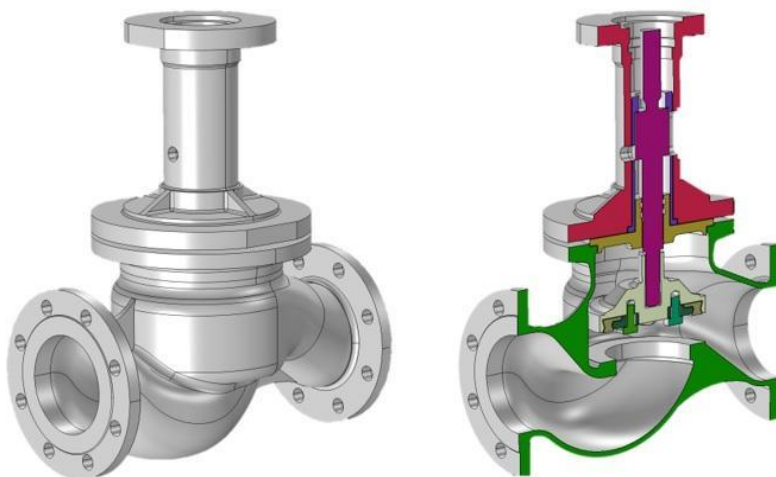


Рисунок 5 – 3D модель невозвратно-запорного клапана

2 Определение гидродинамических и виброакустических характеристик

Расчёт прогнозируемых уровней шума с помощью акустической аналогии Лайтхилла [10] основан на преобразовании системы уравнений Навье-Стокса в неоднородное волновое уравнение, описывающее воздействие на неподвижную среду распределённых в поле турбулентного потока квадрупольных источников. Уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla \cdot \nabla(p') = \frac{\partial^2 L_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}, \quad (1)$$

$$p' = c_0^2(\rho - \rho_0); \quad (2)$$

$$L_{ij} = \rho v_i v_j + ((p - p_0) - c_0^2(\rho - \rho_0))\delta_{ij} - \tau_{ij}, \quad (3)$$

где c_0 – скорость распространения звука в среде, L_{ij} – тензор Лайтхилла, p – суммарное давление, ρ – суммарная плотность, τ_{ij} – тензор вязких напряжений, индекс 0 обозначает параметры жидкости в состоянии покоя, p' – представляет линейную акустическую вариацию давления вне области источников.

В рамках гибридного подхода на первом этапе производится CFD (Computational fluid dynamics) расчёт течения жидкости, выходными параметрами которого являются поля скоростей и давлений, а также компоненты тензора напряжений, которые используются в качестве членов источников в неоднородном волновом уравнении. На втором этапе производится расчёт распространения звука с помощью акустической аналогии. Данный подход позволяет существенно снизить требования к вычислительным ресурсам, при этом основным недостатком является разделение задачи на гидродинамическую и акустическую части, которые позволяют учесть только влияние турбулентного течения на генерацию акустических волн, взаимодействие между собой не учитывается.

По полученной на предыдущем этапе 3D модели создана расчётная область течения жидкости в клапане и сеточная модель. Для определения характеристик потока в начальном приближении был проведён предварительный стационарный расчёт течения несжимаемой жидкости с использованием модели турбулентности $k-\omega$ SST со следующими граничными условиями:

- начальное состояние с нулевым значением искомых переменных;
- течение у стенок без проскальзывания;

- на входе в расчётную область задано среднее значение скорости течения жидкости, равное 1 м/с;
- на выходе из расчётной области задано нулевое давление.

На рисунке 6 представлены результаты предварительного расчёта в виде скалярных полей давления и скорости для последующего использования в качестве начального приближения при расчёте течения вихреразрешающим методом.

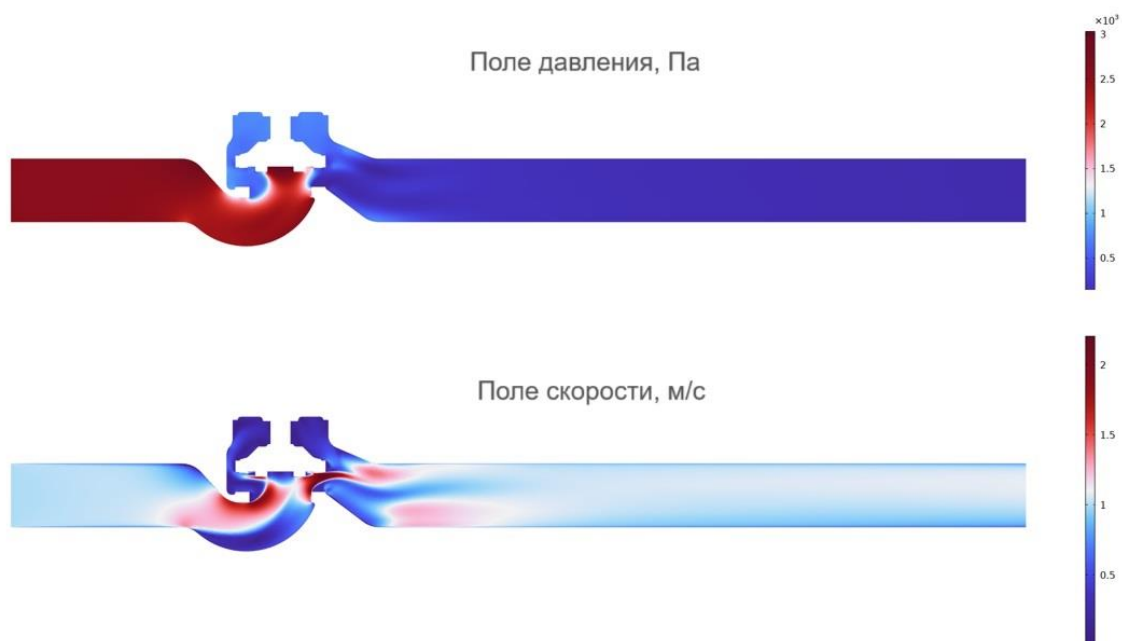


Рисунок 6 – Скалярные поля давления и скорости

Моделирование течения жидкости в клапане методом отсоединённых вихрей производилось в нестационарной постановке с расчётом пристеночного течения RANS моделью Спаларта-Аллмареса. Моделируемое время – 500 мс, шаг – 0,4 мс. По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что при течении жидкости в клапане наблюдаются обширные отрывы потоков (рисунок 7 и 8).

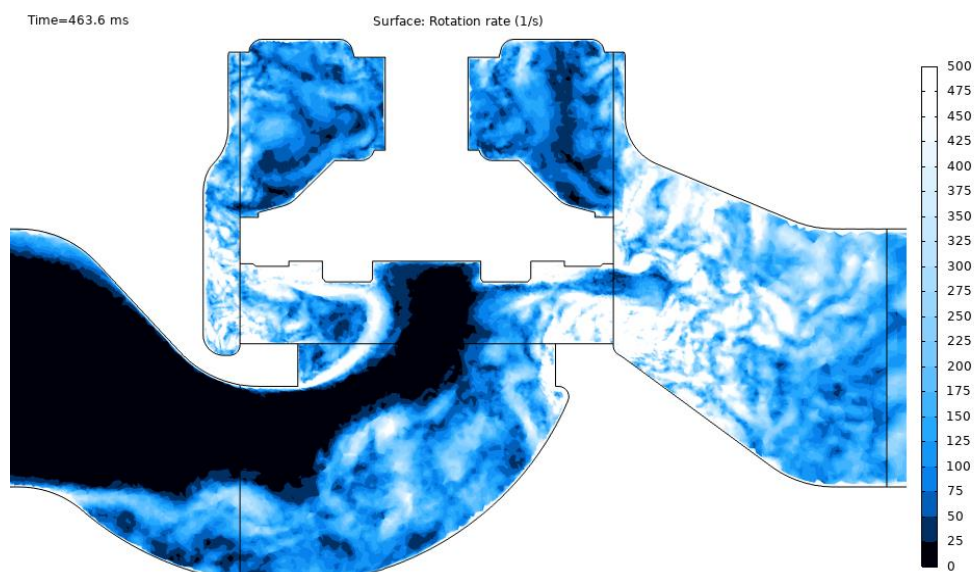


Рисунок 7 – Скалярное поле завихрённости

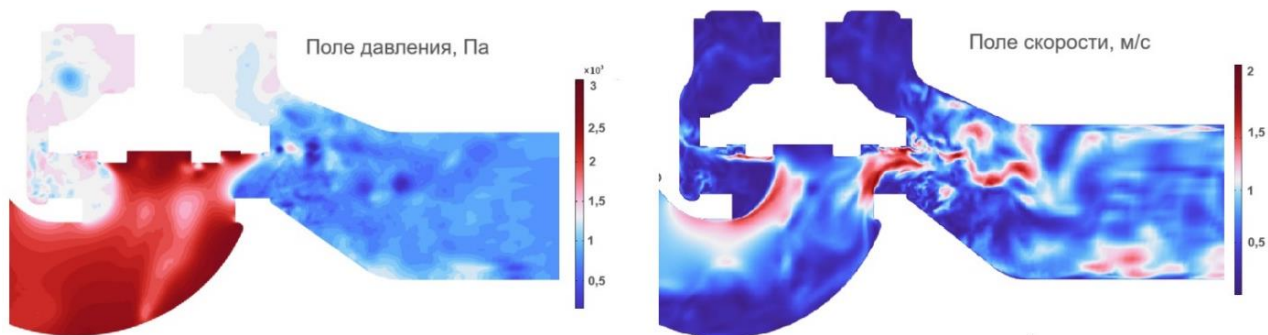


Рисунок 8 – Поле давления и скорости

Прогнозные спектры пульсации гидродинамического давления в контролируемых точках 1 и 2 (приведены на рисунке 9), полученные методом численного моделирования, подтверждают генерацию шума за счёт наличия турбулентных вихревых структур (рисунок 10). Дальнейшие исследования планируется проводить в направлении экспериментального подтверждения результатов, полученных в данной работе.

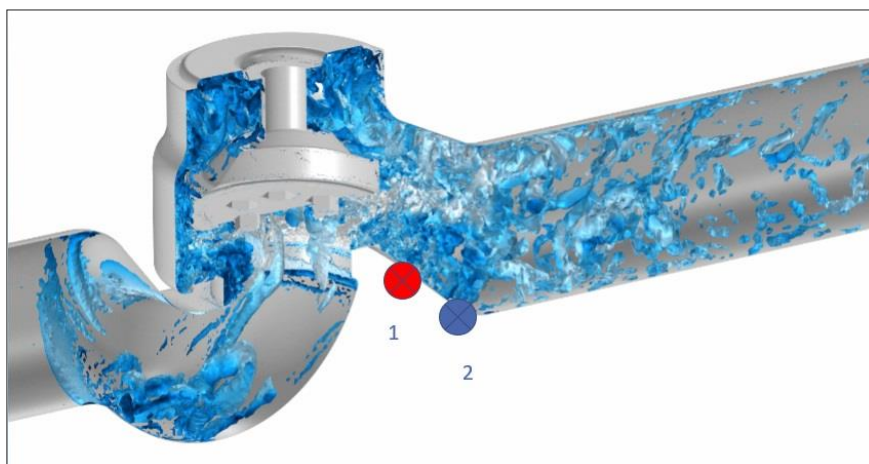


Рисунок 9 – Контролируемые точки 1 и 2 в проточной части клапана

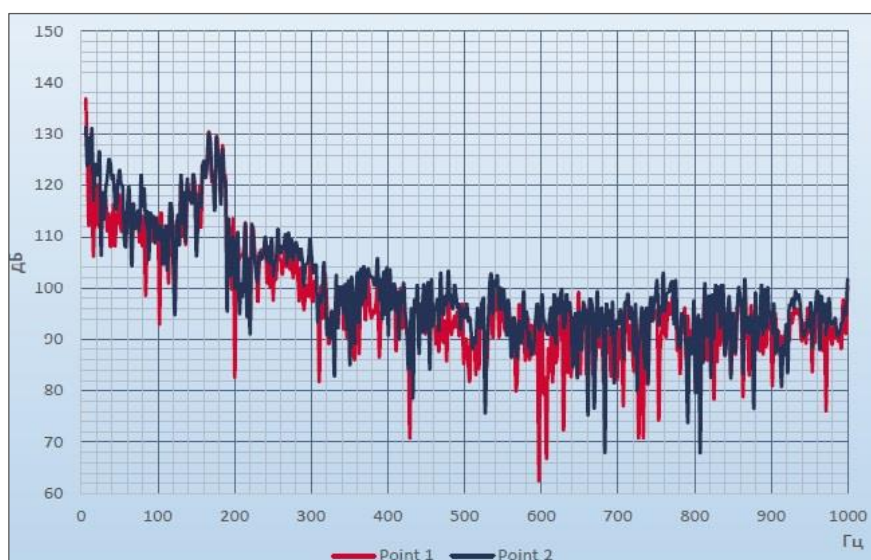


Рисунок 10 – Спектр пульсации гидродинамического давления в контролируемых точках 1 и 2

Заключение

Гибридные подходы, основанные на обратном и традиционном проектировании с использованием методов численного моделирования, являются наиболее перспективными для ускоренного проектирования и прогнозирования характеристик, в том числе виброшумовых. Позволяют уже на начальном этапе выявить недостатки конструкции и, в случае необходимости, произвести оптимизацию с целью достижения заданных требований.

Однако, в отличие от традиционных подходов, отсутствие практического опыта, достоверной статистической информации, результатов верификации и валидации, накопленной базы знаний требует проведения дополнительных исследований, которые должны включать этапы:

- получение информации об объекте инжиниринга;
- разработка и реализация решений для совершенствования;
- разработка документации и производство;
- верификация и валидация результатов;
- анализ результатов и стандартизация подходов.

Список использованных источников

1. Зобов, П. Г. Сравнительный анализ сканирования мелкогабаритных судовых изделий машиностроительной части со сложной внутренней конструкцией при помощи различных моделей 3D-сканеров / П. Г. Зобов, А. В. Дектярев, В. Н. Морозов // Известия КГТУ. – 2020. – №56. – С. 159-171.
2. Китаев, М. В. Применение средств и методов реверс-инжиниринга в судостроении и судоремонте / М. В. Китаев, О. Э. Суров, Е. Е. Соловьева [и др.] // Судостроение. – 2023. – №3(868). – С. 26-33.
3. Сарманаева, А. Ф. Комплексный подход для обеспечения качества продукции, разрабатываемой с применением методов реверс-инжиниринга / А. Ф. Сарманаева, Н. В. Соколов, О. Ю. Паранина [и др.] // Компрессорная техника и пневматика. – 2023. – №4. – С. 42-45.
4. Тараховский, А. Ю. Реверс-инжиниринг коленчатого вала компрессора / А. Ю. Тараховский, И. А. Смирнов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – №18. – С. 91-97. – DOI: 10.26160/2658-3305-2023-18-91-97.
5. Петров, Н. В. Применение технологий 3D-сканирования в реверсивном инжиниринге корпусных деталей / Н. В. Петров, Ш. С. Нозирзода, Е. Д. Петрова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2023. – №1(155). – С. 34-41. – DOI: 10.26730/1999-4125-2023-1-34-41.
6. Кожарина, Т. В. Реверс-инжиниринг деталей почвообрабатывающих машин для проведения конечно-элементного анализа / Т. В. Кожарина, С. В. Карпов, А. Р. Гороновский // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2024. – №1(276). – С. 150-156. – DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-20.
7. Солощенко, П. П. Техническое обслуживание импортных счетчиков газа с использованием реверс-инжиниринга / П. П. Солощенко, Г. В. Симонова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2024. – Т. 6. – С. 263-268. – DOI: 10.33764/2618-981X-2024-6-263-268.
8. Крутиков, М. В. Численное исследование течения в проточной части центробежного нагнетателя природного газа при различных положениях входного направляющего аппарата / М. В. Крутиков, В. Л. Блинов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2021. – № 2(137). – С. 94-108. – DOI: 10.18698/0236-3941-2021-2-94-108.
9. Козлов, В. А. Разработка конструктивных элементов для создания малощумной регулирующей арматуры / В. А. Козлов, Е. А. Куличкова, С. Е. Петров // Динамика и виброакустика. – 2022. – Т. 8, №4. – С. 41-47. – DOI 10.18287/2409-4579-2022-8-4-41-47.
10. Смольяков, А. В. Шум турбулентных потоков / А. В. Смольяков. – Санкт-Петербург: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2005. – 312 с.

Determination of hydrodynamic and vibroacoustic characteristics of a shut-off valve by hybrid engineering method

T. G. Chistyakova

Lead Specialist;
State Marine Technical University, St. Petersburg;
tg.chist@gmail.com

E. A. Kulichkova

Candidate of Science (Engineering);
Deputy CEO;
JSC «Armalit», St. Petersburg;
elenakulichkova@mail.ru

New technologies are a significant factor in improving the efficiency of industrial enterprises. Traditional design methods do not fully meet the needs for technological equipment. A promising direction is hybrid engineering, which combines physical and virtual approaches into a unified process. The basis of this approach is reverse engineering and numerical modeling. The article illustrates the implementation of hybrid engineering through the example of creating a check valve. The results of laser scanning of the parts are presented, with the advantages and disadvantages outlined. The results of the hybrid approach to numerical modeling for noise level prediction are also provided. The necessity for further research to accumulate practical experience, reliable statistical information, verification and validation results, and a knowledge base has been identified. It is confirmed that hybrid approaches are the most promising for accelerated design and prediction of characteristics, allowing the identification of design flaws at an early stage and enabling optimization to meet the specified requirements if necessary.

Keywords: design technology; numerical modeling methods; laser scanning; vibroacoustic characteristics

Citation: Chistyakova, T. G. and Kulichkova, E. A. (2024), "Determination of hydrodynamic and vibroacoustic characteristics of a shut-off valve by hybrid engineering method", *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 10, no. 4, pp. 33-42. DOI: 10.18287/2409-4579-2024-10-4-33-42. (In Russian; abstract in English)

References

1. Zobov, P. G. Dektyarev, A. V. and Morozov, V. N. (2020), "Comparative analysis of the scanning of small-sized shipboard products of an engineering part with a complex internal structure using various models of 3D scanners", *Izvestiya KGTU*, no. 56, pp. 159-171. (In Russian)
2. Kitaev, M. V., Surov, O. E., Solov'eva, E. E. and Novosel'tsev, I. A. (2023), "Application of means and methods of reverse engineering in shipbuilding and shiprepair industry", *Sudostroenie*, no. 3(868). – S. 26-33. (In Russian)
3. Sarmanaeva, A. F., Sokolov, N. V., Paranina, O. Y., Davletshin, I. S., Korshunov, M. V., Akhmetzyanov, A. M. and Ibragimov, E. R. (2023), "An integrated approach to ensure the quality of products developed using reverse engineering methods", *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*, no. 4, pp. 42-45. (In Russian)
4. Tarakhovskiy, A. Yu. and Smirnov, I. A. (2023), "Reverse engineering of the compressor crankshaft", *Transport, mining and construction engineering: science and production*, no. 18, pp. 91-97, DOI: 10.26160/2658-3305-2023-18-91-97. (In Russian)
5. Petrov, N. V., Nozirezoda, Sh. S. and Petrova, E. D. (2023), "Application of 3D-scanning technologies in reverse engineering of body parts", *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, no. 1(155), pp. 34-41. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-1-34-4. (In Russian)
6. Kozharina, T. V., Karpov, S. V. and Goronovskiy, A. R. (2024), "Reverse engineering of tillage machine parts for finite element analysis", *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vuzobnovlyаемых ресурсов*, no. 1(276), pp. 150-156. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-20. (In Russian)

7. Soloshchenko, P. P. and Simonova, G. V. (2024), "Maintenance of imported gas meters using reverse engineering", *Interekspo Geo-Sibir'*, vol. 6, pp. 263-268. DOI: 10.33764/2618-981X-2024-6-263-268. (In Russian)
8. Krutikov, M. V. and Blinov, V. L. (2021), "Numerical study of the flow in the flow path of a centrifugal natural gas compressor at different positions of the inlet guide vane", *Herald of the Bauman Moscow State Technical University*, Series Mechanical Engineering, № 2(137), pp. 94-108. DOI: 10.18698/0236-3941-2021-2-94-108. (In Russian)
9. Kozlov, V. A., Kulichkova, E. A. and Petrov, S. E. (2022), "Development of structural elements for the creation of low-noise control valves", *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, vol. 8, no. 4, pp. 41-47. DOI: 10.18287/2409-4579-2022-8-4-41-47. (In Russian)
10. Smol'yakov, A. V. (2005), *Shum turbulentnykh potokov* [Turbulent flow noise], Krylov State Research Centre, St. Petersburg, 312 p. (In Russian)