

Е. С. КРУПА, В. А. НЕДОВЕСОВ

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ CFD ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОТОКА В ГИДРОМАШИНАХ

В настоящее время актуальным является совершенствование вычислительных программных комплексов, что в свою очередь приводит к конкуренции на рынке программного обеспечения. Специалисты, работающие в любой отрасли, должны владеть компьютером не только на уровне пользователя, но и на уровне программистов, чтобы на базе существующих программных комплексов программировать модули для собственных потребностей. Не исключением является и область гидроэнергетики. В работе проведен аналитический обзор современных программных комплексов CFD. Проанализированы преимущества и недостатки данных программ в части построения трехмерной модели объекта исследования, создания расчетной сетки, задания граничных условий и визуализации результатов расчета. Для решения гидродинамических задач существует много различных программ, одними из передовых коммерческих программных комплексов являются Ansys, SolidWorks Flow Simulation, Autodesk CFD. Так же существуют программы с открытым исходным кодом, самым популярным на данный момент является OpenFOAM. Данные системы автоматического проектирования (САПР) позволяют не только выполнить качественное моделирование систем различной физической природы, но и исследовать отклик этих систем на внешние воздействия в виде распределения давления, температур, скоростей. Алгоритмы проведения расчета в программах похожи, отличительные особенности программ можно оценить по следующим критериям: генерация сетки, точность, надежность (сходимость), скорость вычислений, физика модели, гибкость системы. Так же следует отметить, что коммерческие программные комплексы более удобны в использовании благодаря проработанному интерфейсу пользователя, в бесплатных комплексах интерфейс менее развит и для работы потребуются знания определенного списка команд и знания синтаксиса программы. Для создания геометрии модели так же существует множество программ (SolidWorks, Autodesk Inventor, Компас-3D и др.). Трехмерная модель объекта исследования необходима для последующей интеграции в CFD комплекс. Использование этих программ позволяет сократить цикл разработки, снизить стоимость изделий и повысить качество продукции.

Ключевые слова: гидравлические машины, численное исследование, гидродинамический расчет, математическая модель, пространственное течение, системы автоматического проектирования.

Є. С. КРУПА, В. О. НЕДОВЕСОВ

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОГРАМНИХ КОМПЛЕКСІВ CFD ДЛЯ ЧИСЕЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВОГО ПОТОКУ В ГІДРОМАШИНАХ

В даний час актуальним є вдосконалення обчислювальних програмних комплексів, що в свою чергу призводить до конкуренції на ринку програмного забезпечення. Фахівці, що працюють в будь-якій галузі, повинні володіти комп'ютером не тільки на рівні користувача, але і на рівні програмістів, щоб на базі існуючих програмних комплексів програмувати модулі для власних потреб. Не виключенням є і область гідроенергетики. В роботі проведено аналітичний огляд сучасних програмних комплексів CFD. Проаналізовано переваги та недоліки даних програм в частині побудови тривимірної моделі об'єкта дослідження, створення розрахункової сітки, завдання граничних умов і візуалізації результатів розрахунку. Для вирішення гідродинамічних задач існує багато різних програм, одними з передових комерційних програмних комплексів є Ansys, SolidWorks Flow Simulation, Autodesk CFD. Так само існують програми з відкритим вихідним кодом, найпопулярнішим на даний момент є OpenFOAM. Дані системи автоматичного проектування (САПР) дозволяють не тільки виконати якісне моделювання систем різної фізичної природи, а й досліджувати відгук цих систем на зовнішні впливи у вигляді розподілу тиску, температур, швидкостей. Алгоритми проведення розрахунку в програмах схожі, відмінні риси програм можна оцінити за такими критеріями: генерация сітки, точність, надійність (збіжність), швидкість обчислень, фізика моделі, гнучкість системи. Так само слід відзначити, що комерційні програмні комплекси більш зручні у використанні завдяки відпрацьованому інтерфейсу користувача, в безкоштовних комплексах інтерфейс менш розвинений і для роботи буде потрібно знання певного списку команд і знання синтаксису програми. Для створення геометрії моделі так само існує безліч програм (SolidWorks, Autodesk Inventor, Компас-3D і ін.). Тривимірна модель об'єкта дослідження необхідна для подальшої інтеграції в CFD комплекс. Використання цих програм дозволяє скоротити цикл розробки, знизити вартість виробів і підвищити якість продукції.

Ключові слова: гідравлічні машини, чисельне дослідження, гідродинамічний розрахунок, математична модель, просторове протікання, системи автоматичного проектування.

E. S. KRUPA, V. A. NEDOVESOV

ACTUAL STATUS OF CFD SOFTWARE COMPLEXES FOR NUMERICAL RESEARCH OF SPATIAL FLOW IN HYDRAULIC MACHINES

Currently, the improvement of computer software systems is relevant, which in turn leads to competition in the software market. Specialists working in any industry should work on the computer not only at the user level, but also at the programmer level, for programming modules which are based on existing software systems for their own tasks. The hydropower is no exception. There is an analytical review of modern software systems CFD in this paper. The advantages and disadvantages of these programs are analyzed in terms of building a three-dimensional model of the object of study, creating a computational mesh, setting boundary conditions and visualizing the results of the calculation. There are many different programs for solving hydrodynamic tasks. Some of the advanced commercial software systems are Ansys, SolidWorks Flow Simulation, Autodesk CFD. There are also payment free programs. At the moment the most popular of them is OpenFOAM. These computer-aided designing (CAD) systems allow not only to perform high-quality modeling of systems of various physical nature, but also to investigate the response of these systems to external influences in the form of pressure, temperature, velocity distribution. The algorithms of the calculation in programs are similar. The distinctive features of the programs can be evaluated by the following criteria: mesh generation, accuracy, reliability (convergence), calculation speed, model physics, system flexibility. It should also be noted that commercial software packages are more convenient to use due to a well-developed user interface. The interface is less developed in free complexes. It is necessary to have knowledge of a certain list of commands and the program syntax. Also there are many programs to create model geometry (SolidWorks, Autodesk Inventor, Compass-3D and others). The three-dimensional model of the object of study is necessary for subsequent integration into the CFD complex. Using these programs allows to shorten the development cycle, reduce the cost of products and improve product quality.

Keywords: hydraulic machines, numerical research, hydrodynamic calculation, mathematical model, spatial flow, CAD systems.

© Е. С. Крупа, В. А. Недовесов, 2019

Введение. На данный момент в мире стремительно совершенствуются программные комплексы для численных вычислений. Путем оптимизации программного кода, время, затраченное на вычислительные процессы, уменьшается. Применение улучшенных алгоритмов приводит к расширению возможностей масштабируемости, так же уменьшается время чтения и записи файлов, улучшается сходимость.

Непрерывно совершенствуется интерфейс приложений, что делает работу более простой, быстрой и удобной. Основные процессы алгоритмов вычисления гидродинамической среды во всех аналогичных программных комплексах состоят из следующих пунктов:

- создание геометрии исследуемого объекта;
- задание математической модели расчета;
- создание расчетной сетки;
- задание вводных граничных условий;
- запуск созданной расчетной модели с заданными параметрами в решателе;

- просмотр результатов расчета в графической форме и численном виде [1–11].

Обзор программ САПР для создания геометрии потока. Крупнейшие компании, такие как Autodesk, Dassault Systemes и др., создают вместе с программами для расчета потока так же и программы САПР, в которых можно построить геометрию объекта исследования.

Рассмотрим некоторые продукты САПР, которые можно использовать для построения 3D моделей.

Наиболее популярными и востребованными программами на рынке на данный момент являются SolidWorks, Autodesk Inventor, Kompas 3D и др. [1–11].

В программе SolidWorks 2019 от компании Dassault Systemes, появилась возможность переноса сечений не только на цилиндрические поверхности, но и на фигуры различной сложности. Появились новые возможности Slising, который позволяет создавать 2D сечения в местах пересечения выбранного элемента и набора плоскостей, что в свою очередь облегчает работу при стыковке сложных деталей [3, 15].

Компания Autodesk в этом году обновила сборку Inventor до версии 2019. Новая версия, как уверяет команда разработчиков, намного производительней предыдущих версий. Возможности новой версии сохраняются при условии использования продукта на рекомендуемых системных требованиях. Так же следует отметить, что недавно был представлен AutoCAD 2020 – мощнейшая двух- и трёхмерная система САПР, с новыми дополнительными возможностями [17].

В Workbench 19.1 программного комплекса ANSYS геометрию модели можно построить в разделе SpaceClaim, Geometry или модуле Design Modeler. Следует отметить, что набор инструментов в этих программах намного меньше, чем у вышеперечисленных, но они обладают всеми самыми основными функциями для создания геометрии, так же в этих программах отсутствует интерфейс на русском языке [12–14].

Модуль Workbench – это инновационная схема управления проектом, где можно связывать различные этапы расчетов с различными блоками исследований, проект предоставлен в виде взаимосвязанных систем в форме блок-схем [12–14]. В Autodesk и SolidWorks управление проектом происходит в дереве проекта [15, 17].

Примеры интерфейсов описанных выше программ приведены на рис. 1–3.

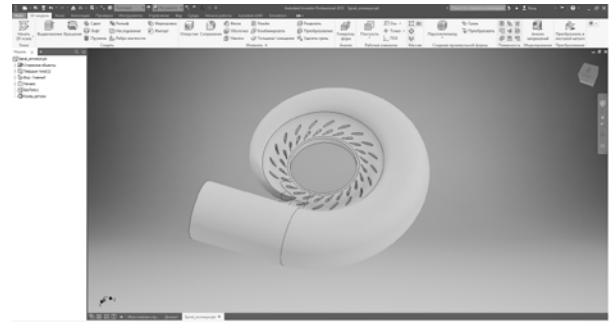


Рис. 1. Твёрдотельная модель проточной части, выполненная в программе Inventor

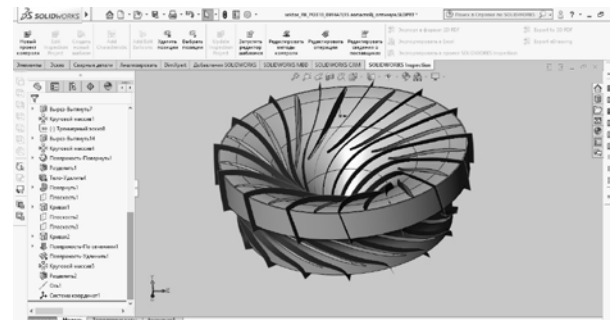


Рис. 2. Твёрдотельная модель проточной части, выполненная в программе SolidWorks

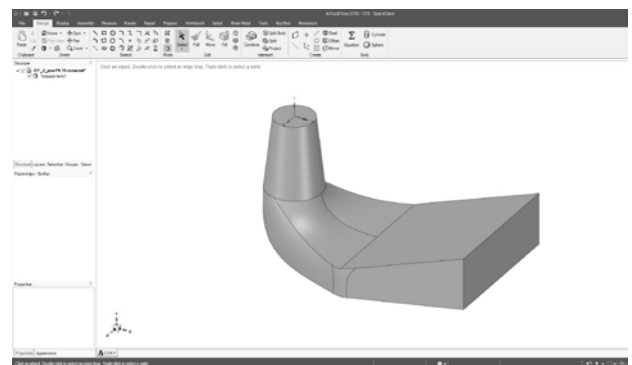


Рис. 3. Твёрдотельная модель проточной части, выполненная в программе SpaceClaim

Создание расчетной сетки. В программах SolidWorks Flow Simulation и в Autodesk CFD расчетная сетка строится автоматически и редактор сетки очень упрощенный по сравнению с подпрограммами от ANSYS. Так же в Autodesk CFD нет четкой последовательности задания параметров, сетка генерируется при запуске решателя [15]. В SolidWorks Flow Simulation сетка генерируется в дереве проекта на ряду с пунктами ввода граничных условий [3, 15].

Подпрограмма ICEM CFD входит в программный комплекс ANSYS, это отличное решение для создания сложных расчетных сеток именно для гидродинамических расчетов, где присутствуют сложные криволинейные элементы. ICEM CFD позволяет строить структурированную (гексагональную) и неструктурированную (тетра) сетки [12–14]. В программе можно вырезать проточные части с общей геометрии гидроагрегата, сгущать расчетные ячейки тем самым создавая пограничный слой. Создание расчетной сетки – это очень важный этап для расчета, так как некорректное построение сетки приведёт к повреждению области расчета (рис. 4) [12–14].

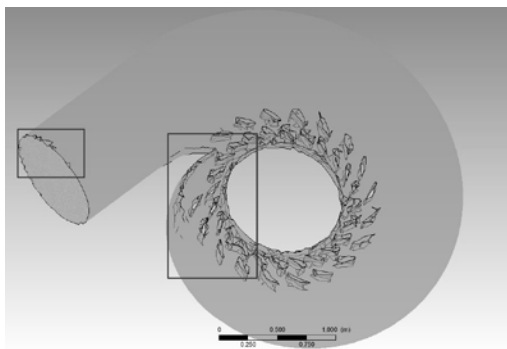


Рис. 4. Поврежденная геометрия проточной части

На рис. 5–7 представлены результаты сгенерированных расчетных сеток в различных программных комплексах.

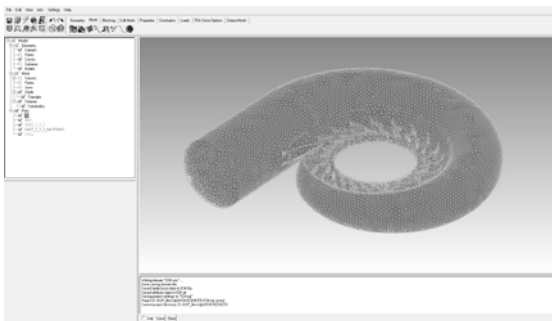


Рис. 5. Расчетная сетка, построенная в ICEM CFD

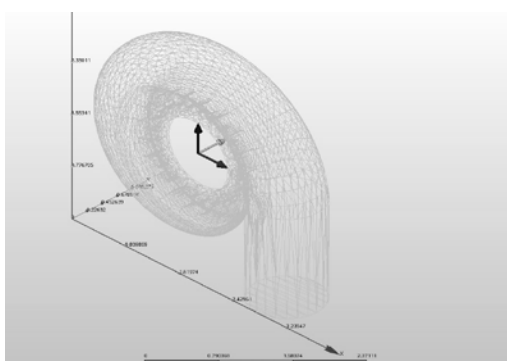


Рис. 6. Расчетная сетка, построенная в Autodesk CFD

Выбор математической модели. Расчет течения жидкости или газа в современных программных продуктах выполняется путем численного решения системы уравнений, описывающих наиболее общий

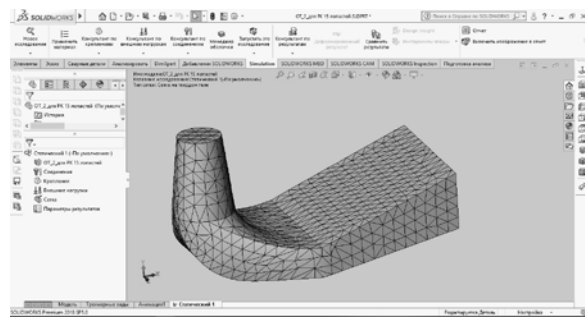


Рис. 7. Расчетная сетка, построенная в SolidWorks

случай движения жидкой среды. Таковым является уравнения Навье - Стокса (1) и неразрывности (2):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0. \quad (2)$$

Здесь использовано сокращенную запись уравнений $i, j = 1-3$, предполагается суммирование по одинаковым индексам, x_1, x_2, x_3 – оси координат, t – время. Член f_i выражает действие массовых сил [8, 9].

В этой системе четырех уравнений независимыми искомыми параметрами являются три компонента скорости u_1, u_2, u_3 и давление p . Плотность ρ жидкости, а также газа при скоростях до 0,3 числа Маха, считается величиной постоянной.

Течения во вращающихся рабочих органах гидромашин рассматриваются в относительной системе отсчета, при этом член f_i в правой части уравнений выражает действие центробежных и кориолисовых сил:

$$\vec{f}_i = -\rho(2\vec{\omega} \times \vec{u} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})), \quad (3)$$

где $\vec{\omega}$ – угловая скорость вращения;

\vec{r} – радиус-вектор (модуль которого равен расстоянию от данной точки до оси вращения).

Течения в гидравлических машинах, как правило, турбулентные. Непосредственное моделирование турбулентных течений путем численного решения уравнений Навье - Стокса, записанных для мгновенных скоростей, является все еще крайне тяжелым, а кроме того, интерес представляют, как правило, не мгновенные, а осредненные во времени значения скоростей. Таким образом, для анализа турбулентных течений вместо уравнений (1) и (2) используют уравнение Рейнольдса (4):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u_i' u_j'}) = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\overline{u_1}, \overline{u_2}, \overline{u_3}$ – осредненные по времени значения скоростей;

$\overline{u'_1}, \overline{u'_2}, \overline{u'_3}$ – пульсационные составляющие скоростей.

Для замыкания этих уравнений используются различные модели турбулентности. При расчетном исследовании гидромашин хорошо зарекомендовали себя следующие модели турбулентности: «k-ε», «k-ω» и SST [1, 4].

Модель «k-ε» использует для замыкания системы уравнений движения жидкости Рейнольдса два дифференциальных уравнения (5–6), описывающих перенос кинетической энергии турбулентности k и скорости диссипации ε.

Недостатками «k-ε» модели является низкая точность при моделировании течений с отрывом от гладких поверхностей, а также необходимость применения специальных приемов при расчете течения вблизи стенок.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u_j k}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \varepsilon, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u_j \varepsilon}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - \rho C_{\varepsilon 2} \varepsilon), \quad (6)$$

где $P_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}$ – член, выражающий генерацию

энергии k, $\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$, $\Gamma_\varepsilon = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$.

Параметры ε и μ определяются следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} \right)^2, \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

Константы «k-ε» модели: $C_\mu = 0,09$; $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$ [1, 4].

Также существует «k-ω» модель турбулентности, разработанная Уилкоксом. В этой модели дифференциальное уравнение скорости диссипации ε заменено на дифференциальное уравнение частоты турбулентных пульсаций ω. Данная модель хорошо показала себя при расчетах вблизи стенок.

Недостатком «k-ω» модели, в отличие от «k-ε» модели, является чрезмерно сильная зависимость результатов расчета от задаваемых значений ω во входном сечении [4].

Гибридный вариант между «k-ε» и «k-ω» моделями турбулентности был предложен Менгером – SST (Shear Stress Transport) модель переноса сдвиговых напряжений. За счет использования специальной переключаемой функции, активируется та или иная модель турбулентности. Переключение осуществляется в зависимости от удаления узлов сетки от стенки.

Таким образом, SST-модель сочетает в себе устойчивость и точность стандартной «k-ω» модели в пристеночных областях и «k-ε» модели на удалении от стенок [4].

Задание вводных граничных условий. В модуле CFX-Pre (ANSYS) задаются граничные условия в дереве программы [14].

На границах расчетных областей задаются следующие параметры:

- на входе – массовый режимный расход;
- на стенке – условие прилипания (скорость равна нулю);
- на выходе – статическое давление.

Далее необходимо сохранить файл .def, который будет вмещать в себя расчетную область со всеми вводными параметрами, который можно будет при потребности изменить.

Переходим к следующему этапу, а именно к самому численному расчету. Если мы создали проект в Workbench, то нужно перейти к следующему по списку действию Solution. Впоследствии должен открыться модуль CFX-Solver Manager с уже выбранным файлом для расчета. Здесь можно задать количество ядер процессора, которые будут задействованы в вычислениях. При старте расчета, в режиме онлайн видно построения графиков и прохождения итераций (рис. 8). После окончания расчета получаем файл .res с результатами.

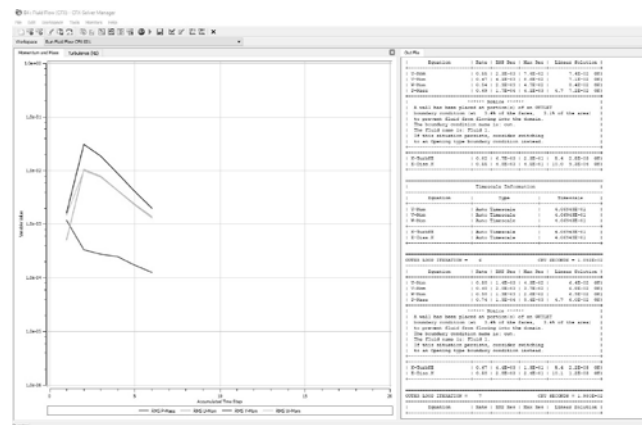


Рис. 8. Интерфейс CFX-Solver Manager

Аналогично задаются граничные условия в Autodesk CFD и SolidWorks Flow Simulation. Однако в данных программных комплексах, в отличие от ANSYS, в котором существует четкая последовательность Geometry-Mesh-Setup-Solution-Results, расчетная сетка задается наряду с граничными условиями.

Результаты численного исследования пространственного потока в проточной части гидромашин. Чтобы посмотреть результаты гидродинамического расчета в программном комплексе ANSYS необходимо загрузить файл с результатами [16, 19–20].

В дереве проекта имеется возможность задавать дополнительные плоскости, на которых отображаются нужные параметры, такие как давления, скорости,

температура. На плоскостях отобразится распределение заданных величин в соответствии со шкалой.

Вид и деление шкалы можно изменять. Так же есть возможность визуализации линий потока с функцией анимации. Все графические результаты можно комбинировать [19–20].

Для получения численных данных рекомендуется использовать таблицу, в которую нужно прописать функции.

Всеми этими функциями обладают также программные комплексы SolidWorks и Autodesk. Кроме того, в данных программах присутствуют различные шаблоны отчетов, которые можно экспортировать в Microsoft Word [15, 17].

На рис. 9–11 представлены примеры графической визуализации результатов численных исследований, выполненных в различных программных комплексах CFD.

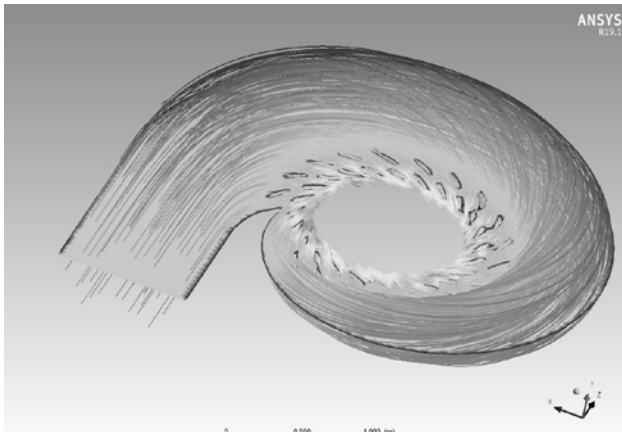


Рис. 9. Графическое представление результатов в Ansys

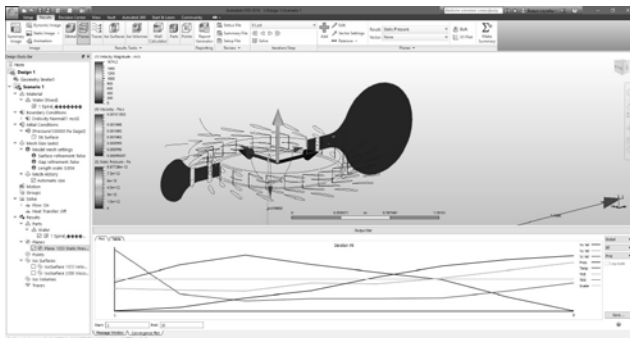


Рис. 10. Графическое представление результатов в Inventor

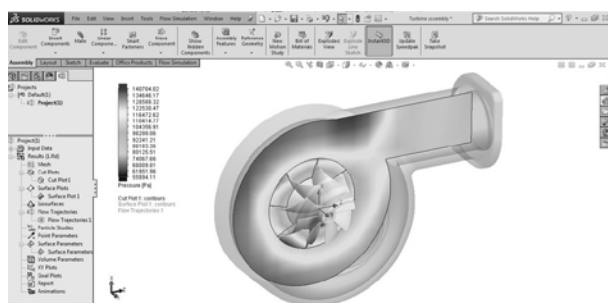


Рис. 11. Графическое представление результатов в SolidWorks Flow Simulation

Выводы. В работе выполнен аналитический обзор современного состояния программных комплексов для численного исследования потока в прочных частях гидромашин, таких как SolidWorks, Autodesk, Ansys.

Описаны основные функциональные возможности программ CFD в части построения геометрии исследуемого объекта, создания сетки, последующего расчета и визуализации результатов исследования.

Использование современных программ CFD для исследования гидродинамических характеристик потока в гидромашине значительно уменьшает затраты времени и материальных ресурсов по сравнению с физическим моделированием.

Список литературы

1. Кочевский А. Н., Неня В. Г. Современный подход к моделированию и расчету течений жидкости в лопастных гидромашинах. *Вісник Сумського державного університету: Сер.: Технічні науки*. Суми: СумДУ. 2003. № 13 (59). С. 195–210.
2. Rezvaya K., Krupa E., Drankovskiy V., Potetenko O., Tynyanova I. The numerical research of the flow in the inlet of the high-head hydraulic turbine. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solution in modern technologies*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2017. No. 7 (1229). P. 97–102. doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.13
3. Drankovskiy V. E., Rezvaya K. S., Krupa E. S. Calculating three-dimensional fluid flow in the spiral casing of the reversible hydraulic machine in turbine mode. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2016. No. 20 (1192). P. 53–57.
4. Шевченко Н. Г., Шудрик А. Л., Радченко Л. Р. Особенности численного моделирования течения вязкой жидкости в каналах погружных лопастных насосов низкой и средней быстроходности. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2015. No. 45 (1154). P. 76–81.
5. Duan X. H., Kong F. Y., Liu Y. Y., Zhao R. J., Hu Q. L. The numerical simulation based on CFD of hydraulic turbine pump. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 129*. 2016.
6. Резва К. С., Дранковський В. Е., Тиньянова І. І. Дослідження високонапорних оборотних гідромашин. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2017. No. 42 (1264). P. 84–88.
7. Elin A., Lugova C., Kolesnik E. Testing of the CFX-5 package on the examples of flow of liquid and gas in the running parts of VNIAEN specialization pumps: flow modeling in the flow part of the intermediate stage of the multistage centrifugal pump. *Scientific and practical journal "Pumps and equipment"*. 2007. Vol. 6 (47). P. 42–46.
8. Rusanov A., Rusanov R., Lampart P., Designing and updating the flow part of axial and radial-axial turbines through mathematical modeling. *Open Engineering*. 2015. Vol. 5. P. 399–410.
9. Starodubtsev Y. V., Gogolev I. G., Solodov V. G. Numerical 3D model of viscous turbulent flow in one stage gas turbine and its experimental validation. *Journal of Thermal Science*. 2005. Vol. 14. P. 136–141.
10. Bychkov I. M. Verification of the OpenFOAM application package on aerodynamic profile flow problems. *XIX school-seminar "Aerodynamics of Aircraft"*. 2008.
11. Stefan D., Rudolf P. Proper Orthogonal Decomposition of Pressure Fields in a Draft Tube Cone of the Francis (Tokke) Turbine Model. *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. Vol. 579.
12. ANSYS CFX: *CFD Software*. URL: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx> (дата обращения: 02.04.2019).
13. ANSYS ICFM CFD | *CAE Expert*. URL: <https://cae-expert.ru/product/ansys-icem-cfd> (дата обращения: 02.04.2019).

14. ANSYS ICEM CFD, Сеточный генератор – CADFEM. URL: <https://www.cadfm-cis.ru/products/ansys/geometry/icemcfd/> (дата обращения: 03.04.2019).
15. Что нового в SOLIDWORKS 2019. URL: https://intersed.kiev.ua/news_whats_new_solidworks_2019 (дата обращения: 03.04.2019).
16. ANSYS CFX, Моделирование течений, расчет турбомашин – CADFEM. URL: <https://www.cadfm-cis.ru/products/ansys/fluids/cfx/> (дата обращения: 03.04.2019).
17. Autodesk CFD | CFD Software | Autodesk. URL: <https://www.autodesk.com/products/cfd/overview> (дата обращения: 03.04.2019).
18. Новості / Хабр. URL: <https://habr.com/ru/news/> (дата обращения: 03.04.2019).
19. 2.4.6. Show Volume Rendering. URL: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/cfd_posttutr/cfxPostDispShow2_rend.html (дата обращения: 04.04.2019).
20. (186) Tutorial Ansys – How to Make Simulation Fluid Flow by CFX (Simple for Beginner) – YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=PfZ0opXcqAQ> (дата обращения: 04.04.2019).

References (transliterated)

1. Kochevskiy A. N., Nenyа V. G. Sovremenny podkhod k modelirovaniyu i raschetu techeniy zhidkosti v lopastnykh gidromashinakh [Modern approach to modeling and calculating fluid flow in blade hydraulic machines]. *Visnyk Sums'koho derzhavnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky* [Sumy State University Bulletin: Technical Sciences Series]. Sumy, SumDU Publ., 2003, no. 13 (59), pp. 195–210.
2. Rezvaya K., Krupa E., Drankovskiy V., Potetenko O., Tynyanova I. The numerical research of the flow in the inlet of the high-head hydraulic turbine. *Bulletin of NTU "KhPI". Ser.: New solutions in modern technologies*. Kharkiv: NTU "KhPI" Publ., 2017, vol. 7 (1229), pp. 97–102, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.13
3. Drankovskiy V. E., Rezvaya K. S., Krupa E. S. Calculating three-dimensional fluid flow in the spiral casing of the reversible hydraulic machine in turbine mode. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 20 (1192), pp. 53–57.
4. Shevchenko N. G., Shudrik A. L., Radchenko L. R. Osobennosti chislennogo modelirovaniya techeniya vyazkoy zhidkosti v kanalah pogruzhnykh lopastnykh nasosov nizkoy i sredney bystrohodnosti [Features of numerical modeling flow of viscous liquid in channels of submersible bladed pumps of low and average rapidity]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015., no. 45 (1154), pp. 76–81.
5. Duan X. H., Kong F. Y., Liu Y. Y., Zhao R. J., Hu Q. L. The numerical simulation based on CFD of hydraulic turbine pump. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 129*. 2016.
6. Riezva K. S., Drankovskiy V. E., Tynyanova I. I. Doslidzhennia vysokonapornykh oborotnykh hidromashyn [The investigation of the high-pressure reversible hydraulic machines]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2017, no. 42 (1264), pp. 84–88.
7. Elin A., Lugova C., Kolesnik E. Testing of the CFX-5 package on the examples of flow of liquid and gas in the running parts of VNIIAEN specialization pumps: flow modeling in the flow part of the intermediate stage of the multistage centrifugal pump. *Scientific and practical journal "Pumps and equipment"*. 2007, vol. 6 (47), pp. 42–46.
8. Rusanov A., Rusanov R., Lampart P., Designing and updating the flow part of axial and radial-axial turbines through mathematical modeling. *Open Engineering*. 2015, vol. 5, pp. 399–410.
9. Starodubtsev Y. V., Gogolev I. G., Solodov V. G. Numerical 3D model of viscous turbulent flow in one stage gas turbine and its experimental validation. *Journal of Thermal Science*. 2005, vol. 14, pp. 136–141.
10. Bychkov I. M. Verification of the OpenFOAM application package on aerodynamic profile flow problems. *XIX school-seminar "Aerodynamics of Aircraft"*. 2008.
11. Stefan D., Rudolf P. Proper Orthogonal Decomposition of Pressure Fields in a Draft Tube Cone of the Francis (Tokke) Turbine Model. *Journal of Physics: Conference Series*. 2015, vol. 579.
12. ANSYS CFX: CFD Software. Available at: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx> (accessed 02.04.2019).
13. ANSYS ICEM CFD / CAE Expert. Available at: <https://cae-expert.ru/product/ansys-icem-cfd> (accessed 02.04.2019).
14. ANSYS ICEM CFD, Setochnyy generator – CADFEM [ANSYS ICEM CFD, Grid generator – CADFEM]. Available at: <https://www.cadfm-cis.ru/products/ansys/geometry/icemcfd/> (accessed 03.04.2019).
15. Chto novogo v SOLIDWORKS 2019 [What's new in SOLIDWORKS 2019]. Available at: https://intersed.kiev.ua/news_whats_new_solidworks_2019 (accessed 03.04.2019).
16. ANSYS CFX, Modelirovanie techeniy, raschet turbomashin – CADFEM [ANSYS CFX, Modeling of currents, calculation of turbomachines – CADFEM]. Available at: <https://www.cadfm-cis.ru/products/ansys/fluids/cfx/> (accessed 03.04.2019).
17. Autodesk CFD | CFD Software | Autodesk. Available at: <https://www.autodesk.com/products/cfd/overview> (accessed 03.04.2019).
18. Novosti / Habr [News / Habr]. Available at: <https://habr.com/ru/news/> (accessed 03.04.2019).
19. 2.4.6. Show Volume Rendering. Available at: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/cfd_posttutr/cfxPostDispShow2_rend.html (accessed 04.04.2019).
20. (186) Tutorial Ansys – How to Make Simulation Fluid Flow by CFX (Simple for Beginner) – YouTube. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=PfZ0opXcqAQ> (accessed 04.04.2019).

Поступила (received) 07.05.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Крупа Євгеній Сергійович (Крупа Евгений Сергеевич, Krupa Evgeniy Sergeevich) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2457-0097>; e-mail: zhekr@ukr.net

Недовесов Владлен Олександрович (Недовесов Владлен Александрович, Nedovesov Vladlen Aleksandrovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0946-0658>; e-mail: nedovesov1995@gmail.com