

УДК 62-97/-98

doi 10.54708/22259309_2025_23315

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО КЛАПАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ANSYS CFX

Е. Э. БИКМУХАМЕТОВА¹, Д. А. МИНИГУЛОВА², Р. Р. КАЛИМУЛЛИН³

¹ elizavetabikmuh@gmail.com, ² dilaraminigulova750@gmail.com, ³ kalimullin.rr@ugatu.su

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ)

Аннотация. В работе представлена методика проектирования гидравлического клапана в программном комплексе ANSYS. Рассмотрены различные модели турбулентности. Для гидродинамического расчета выбран нестационарный метод моделирования с учетом турбулентных течений. В результате расчета получены векторы скоростей для жидкости и газа, поля распределения давления и отображение появившейся кавитации.

Ключевые слова: модель турбулентности; расчет; гидравлический клапан; ANSYS CFX; модель; течение.

Стремительное развитие вычислительной техники и программного обеспечения в части инженерных расчетов характеризуется не только беспрецедентной скоростью, но и высокой точностью получаемых результатов.

Моделирование становится мощным инструментом для решения сложнейших задач в агрегатостроении. В частности, гидравлический клапан (рис. 1), обладая сложной геометрией проточной части, является пространством для возникновения множества гидродинамических явлений, таких как срывы потока, кавитация и турбулентные завихрения. Программный комплекс ANSYS CFX позволяет не только выявить, но и детально описать эти сложные процессы.

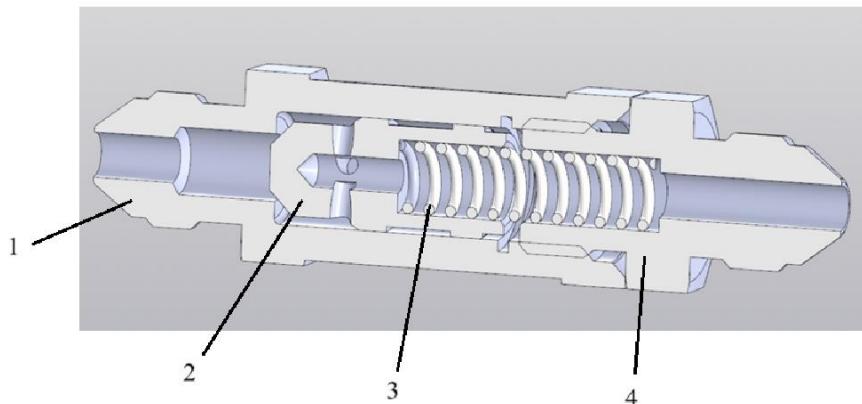


Рис. 1. Гидравлический клапан в разрезе:
1 – корпус; 2 – клапан; 3 – пружина; 4 – штуцер

ANSYS CFX завоевал широкое признание в машиностроительной отрасли, эффективно применяясь для моделирования гидродинамики насосов, вентиляторов, компрессоров, газовых и гидротурбин, включая анализ взаимодействия вращающихся и неподвижных лопаток.

Надежность и точность расчетов в ANSYS CFX обеспечиваются за счет распараллеливаемого решателя и обширного набора математических и физических моделей. Интуитивно понятный и гибкий графический интерфейс позволяет адаптировать и автоматизировать процесс моделирования [1].

При моделировании гидродинамических процессов критически важным является выбор адекватной модели турбулентности. ANSYS предлагает широкий спектр моделей турбулентности, каждая из которых оптимизирована для решения определенных типов задач.

Модели на основе RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) – эти модели усредняют уравнения Навье-Стокса и подходят для большинства инженерных задач с умеренными вычислительными затратами.

Standard k- ϵ (k-epsilon) устойчива, хорошо работает для свободных сдвиговых течений (например, струи, смесительные устройства). Однако неточная в зонах с сильным градиентом давления, отрывом потока или вращением.

Realizable k- ϵ – улучшенная версия k- ϵ , лучше предсказывает распространение струй и течения с сильной кривизной. Применима для течения с вращением, циклонные сепараторы, автомобильная аэrodинамика.

SST k- ω (Shear Stress Transport) комбинирует k- ϵ (вдали от стенки) и k- ω (вблизи стенки). Учитывает перенос касательных напряжений. Хорошо работает при обратном градиенте давления.

Spalart-Allmaras (SA) – одноуравненная модель, оптимизирована для внешней аэродинамики. Применяется в аэрокосмической промышленности (обтекание крыльев, фюзеляжей), течениях с малым уровнем турбулентности.

Reynolds Stress Model (RSM) учитывает анизотропию турбулентности, решает уравнения для всех компонент напряжений Рейнольдса. Используется при расчете сильно анизотропных течений (вихри, вращающиеся потоки), химические реакторы, центробежные насосы).

Выбор модели зависит от типа течения, требуемой точности и доступных вычислительных ресурсов. Для большинства инженерных задач достаточно моделей RANS (SST k- ω , Realizable k- ϵ), тогда как LES/DES применяются для исследований, требующих детального анализа нестационарных эффектов.

Для расчета гидравлического клапана были выбраны k- ϵ модель турбулентности, расчет при ламинарном течении и при SSG Reynolds Stress модели турбулентности.

Для расчета газодинамических процессов в программе ANSYS CFX разработана сеточная модель гидравлического клапана (рис. 2), при условиях, показанных на рис. 3.

Форма ячеек тетраэдрическая, максимальный размер не превышает 2 мм, общее количество ячеек 897616.

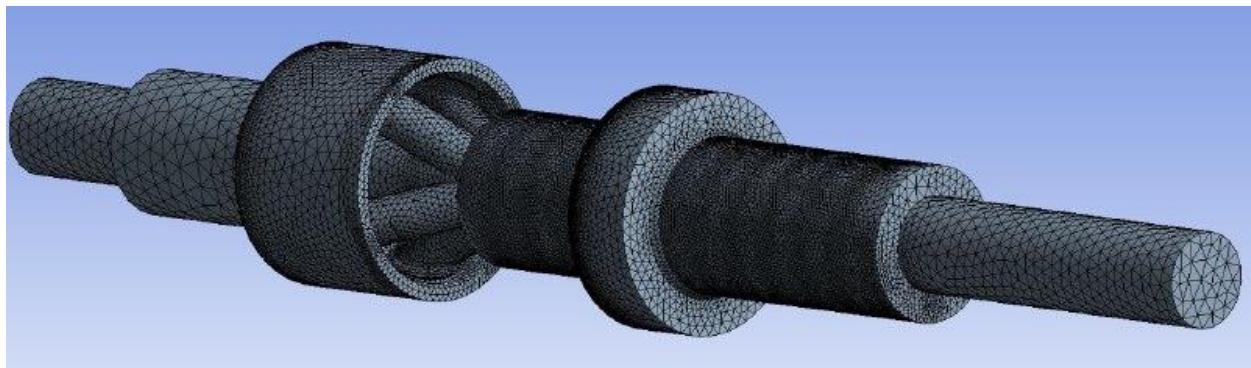


Рис. 2. Проточная часть гидравлического клапана с сеткой

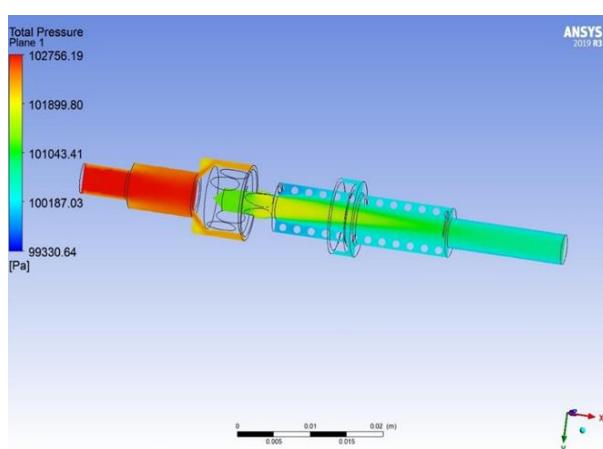
Details of "Mesh"	
-	Display
	Display Style Use Geometry Setting
-	Defaults
	Physics Preference CFD
	Solver Preference CFX
	Element Order Linear
<input type="checkbox"/>	Element Size 1, mm
-	Sizing
	Use Adaptive Sizing No
<input type="checkbox"/>	Growth Rate Default (1,2)
<input type="checkbox"/>	Max Size 2, mm
	Mesh Defeaturing Yes
<input type="checkbox"/>	Defeature Size Default (5,e-003 mm)
	Capture Curvature Yes
<input type="checkbox"/>	Curvature Min Size Default (1,e-002 mm)
<input type="checkbox"/>	Curvature Normal Angle Default (18,°)
	Capture Proximity No
	Bounding Box Diagonal 69,455 mm
	Average Surface Area 66,424 mm ²
	Minimum Edge Length 0,89173 mm
+	Quality
+	Inflation
+	Advanced
-	Statistics
<input type="checkbox"/>	Nodes 179423
<input type="checkbox"/>	Elements 897616

Рис. 3. Параметры сетки

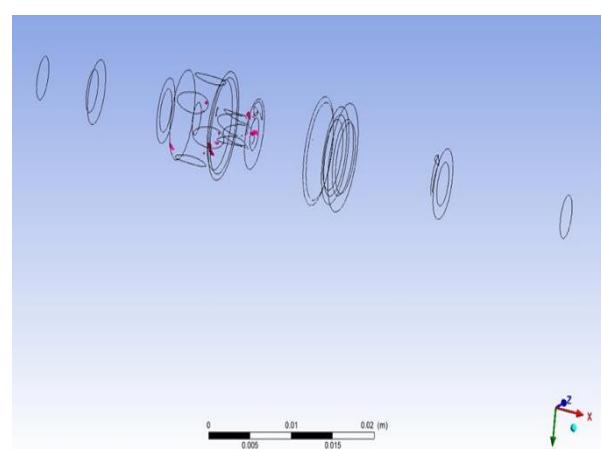
Для гидродинамического расчета выбран нестационарный метод моделирования с учетом турбулентных течений. В первом случае использована $k-\varepsilon$ модель турбулентности. Смоделирована двухфазная среда. Первая среда – вода, вторая – газ. При решении учитываются условия возникновения кавитации. Во втором случае принят поток ламинарным. В третьем случае использована SSG Reynolds Stress модель турбулентности.

В результате расчета получены векторы скоростей для жидкости и газа, поля распределения давления и отображение появившейся кавитации (рис. 4–15).

Поля распределения давления

Рис. 4. $k-\varepsilon$ модель турбулентности

Распределение кавитации по обратному клапану

Рис. 5. $k-\varepsilon$ модель турбулентности

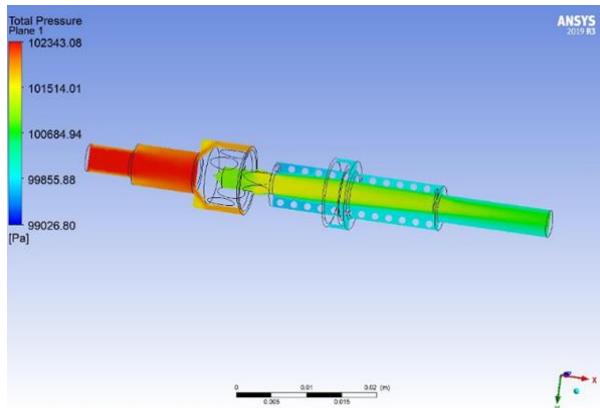


Рис. 6. Ламинарный поток

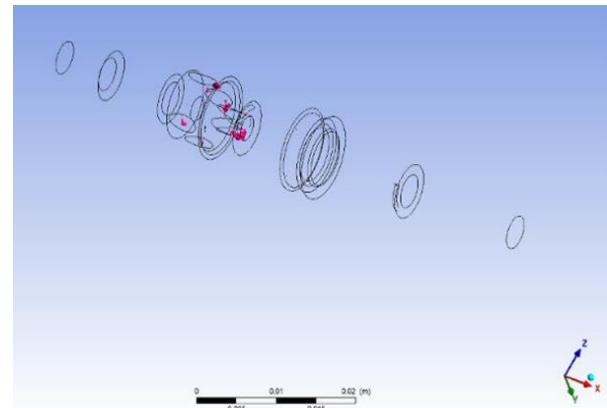


Рис. 7. Ламинарный поток

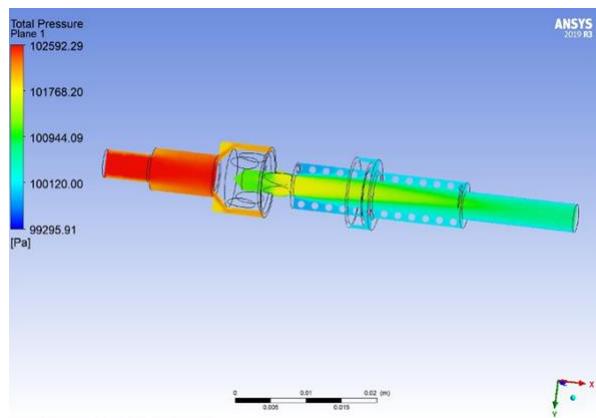


Рис. 8. SSG Reynolds Stress модель турбулентности

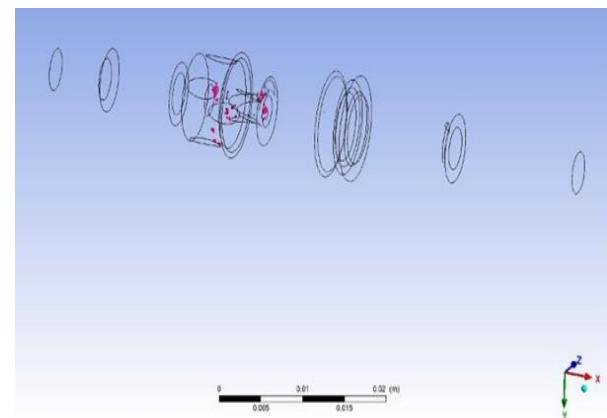


Рис. 9. SSG Reynolds Stress модель турбулентности

Вектор скорости для жидкости

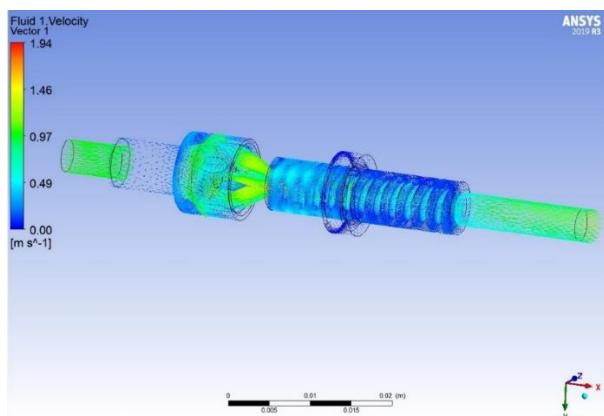


Рис. 10. k- ϵ модель турбулентности

Линии тока для газа

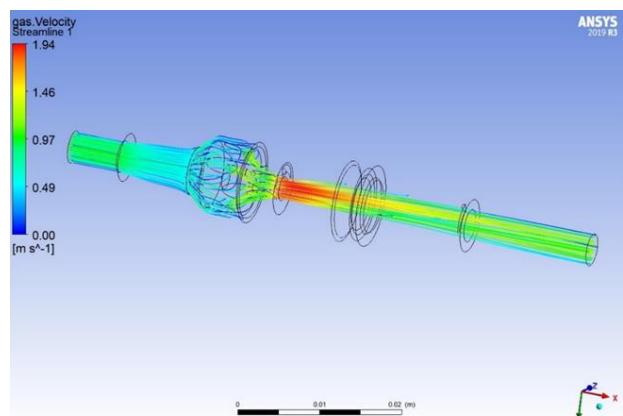


Рис. 11. k- ϵ модель турбулентности

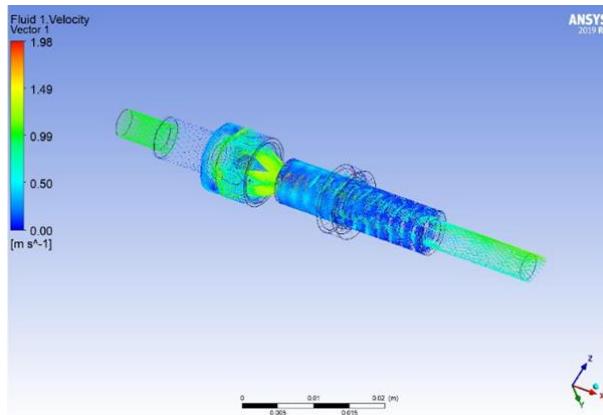


Рис. 12. Ламинарный поток

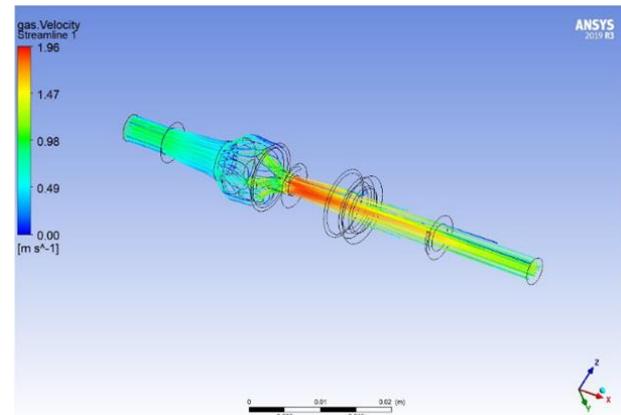


Рис. 13. Ламинарный поток

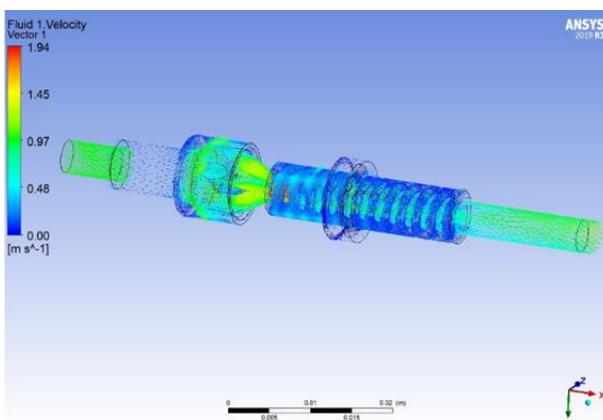


Рис. 14. SSG Reynolds Stress модель турбулентности

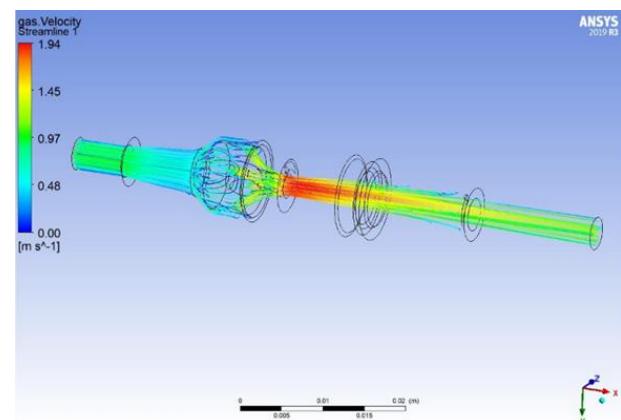


Рис. 15. SSG Reynolds Stress модель турбулентности

В программном комплексе ANSYS CFX имеется возможность проводить расчеты по различным моделям турбулентности с учетом тех задач, которые перед нами поставлены. Модель турбулентности $k-\varepsilon$ использует уравнение переноса кинетической энергии турбулентности и скорость ее диссипации. Такой вид турбулентности дал хорошую сходимость результатов. Но хуже расчеты пристеночных течений.

Модель турбулентности SSG содержит в себе уравнения переноса Рейнольдсовых напряжений и уравнение переноса удельной диссипации. Это более сложная модель турбулентности по сравнению с $k-\varepsilon$ турбулентностью. Такая модель обладает более точным решением и показывает точную вычислительную эффективность. Расчет был произведен быстрее, чем при $k-\varepsilon$ моделью.

Ламинарное течение не учитывает турбулентных потоков, а соответственно дает наибольшую погрешность. Кавитация при ламинарном течении более выраженная.

В результате моделирования выявлено, что максимальное значение давление принимает на входе в клапан. Если судить по видам турбулентности, то максимальное – при расчете с $k-\varepsilon$ моделью, а минимальное – при ламинарном течении.

Таблица 1

Сравнение полученных параметров

Измеряемая величина	$k-\varepsilon$	Ламинарное	SSG Reynolds Stress
Давление, кПа	102,756	102,343	102,592
Скорость, м/с	1,94	1,96	1,94

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ansys CFX | Динамика жидкостей и газов — МЦД. [Электронный ресурс] // Моделирование и цифровые двойники: [сайт]. URL: <https://www.cadfem-cis.ru/products/ansys/fluids/cfx/> (дата обращения: 30.04.2025).
2. Проектирование турбомашин: обзор моделей турбулентности. [Электронный ресурс] // ANSYS.Advantage Russia: [сайт]. URL: <https://www.ansysadvantage.ru/turbomachinery-design-a-review-of-turbulence-models/> (дата обращения: 30.04.2025).
3. **Маламанов С. Ю., Павловский В. А.** Моделирование турбулентности в струйном течении с помощью гидродинамического модуля ANSYS. CFX [Текст] / С. Ю. Маламанов, В. А. Павловский // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2013. № 1. С. 77–84
4. **Щербаков М. А., Юн А. А., Крылов Б. А.** Сравнительный анализ моделей турбулентности с использованием научного кода “Fastest-3D” и коммерческого пакета ANSYS CFX [Текст] / М. А. Щербаков, А. А. Юн, Б. А. Крылов. С. 1–13.

ОБ АВТОРАХ

БИКМУХАМЕТОВА Елизавета Эдуардовна, магистрант, инженер каф. ПГМ.

МИНИГУЛОВА Дилара Альбертовна, магистрант каф. ПГМ.

КАЛИМУЛЛИН Радик Рифкатович, канд. техн. наук, доцент каф. ПГМ.

METADATA

Title: Numerical study of the hydraulic valve fluid dynamics using ANSYS CFX

Author: E.E. Bikmukhametova¹, D.A. Minigulova², R.R. Kalimullin³

Affiliation:

^{1,2,3} Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹elizavetabikmuh@gmail.com, ² dilaraminigulova750@gmail.com, ³ kalimullin.rr@ugatu.su

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology) no. 2 (33), pp. 15-20, 2025. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: The paper presents a methodology for designing a hydraulic valve in the ANSYS software package. Various models of turbulence are considered. For the hydrodynamic calculation, an unsteady modeling method is chosen, taking into account turbulent flows. As a result of the calculation, velocity vectors for liquid and gas, pressure distribution fields, and a display of the cavitation were obtained.

Key words: Turbulence model, calculation, hydraulic valve, ANSYS CFX, model, flow.

About authors:

БИКМУХАМЕТОВА Елизавета Эдуардовна, student, Dept. of APPLIED HYDROMECHANICS (UUST).

МИНИГУЛОВА Дилара Альбертовна, student, Dept. of APPLIED HYDROMECHANICS (UUST).

КАЛИМУЛЛИН Радик Рифкатович, Assoc.prof., Dept. of PGM USATU. Cand. Tech.Sci.