

УДК 533.69

DOI 10.52167/1609-1817-2023-126-3-498-506

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ КОМПОНОВКИ ПРОТИВОТАНКОВОЙ РАКЕТЫ

Н.Т. Жетенбаев<sup>1,2</sup>, А.Е. Сұлтан<sup>1,2</sup>, А.Е. Аязбай<sup>1,2</sup>,  
Е.С. Нұрғизат<sup>1,2</sup>, Ж.А. Кожабек<sup>1</sup>.

Центр инновационных разработок «Тумар», Алматинский университет энергетики и связи  
имени Г. Даукеева, Алматы, Казахстан  
E-mail: n.zhetenbaev@aes.kz

**Аннотация.** В данной работе представлен анализ аэродинамических характеристик модели противотанковой ракеты на основе метода численного моделирования – вычислительная гидродинамика (англ. Computational fluid dynamics – CFD). Данное исследование позволяет получить ценные сведения об аэродинамике модели противотанковой ракеты с помощью симуляции физических процессов в OpenFOAM и метода визуализации воздушных потоков в ParaView. Результаты, полученные с помощью метода анализа остатков (residuals) для компонентов скорости ( $U_x, U_y, U_z$ ) и давления ( $p$ ) способствуют пониманию аэродинамики противотанковой ракеты, указывая на важность тщательного проектирования конструкции для достижения оптимальных аэродинамических характеристик (скорость, дальность, манёвренность).

**Ключевые слова.** Аэродинамика, противотанковая ракета, аэродинамическая компоновка, вычислительная гидродинамика, численное моделирование, OpenFOAM, ParaView.

### Введение

Противотанковые ракеты в составе противотанкового ракетного комплекса (ПТРК) являются ключевым компонентом современной военной технологии, обеспечивая эффективное поражение бронированных целей на поле боя [1-2].

Одним из важных аспектов их конструкции является аэродинамическая компоновка, которая играет решающую роль в стабильности полёта, точности наведения и манёвренности ракеты. Верные расчёты аэродинамических параметров позволяет противотанковым ракетам преодолевать сопротивление воздуха, поддерживать устойчивую траекторию и достичь цели с высокой точностью.

Понимание аэродинамической компоновки противотанковых ракет является ключевым для разработки более эффективных и точных военных систем. Она помогает улучшить оперативные характеристики ракет и повысить их эффективность в различных боевых сценариях.

Аэродинамическая конфигурация противотанковых ракет играет решающую роль в достижении высоких характеристик ракеты. Правильно разработанная аэродинамика позволяет обеспечить максимальную эффективность полёта, манёвренность и точность поражения целей.

Одной из основных задач аэродинамической конфигурации является снижение аэродинамического сопротивления ракеты. Меньшее сопротивление воздуха позволяет ракете сохранять высокую скорость и дальность полёта, что особенно важно при преодолении больших расстояний до цели [3]. Это достигается через оптимизацию формы и профиля ракеты, минимизацию использования острых краёв и углов, а также сокращение лишних выступающих элементов.

Важным аспектом аэродинамики является также обеспечение стабильности полёта ракеты. Стабильность достигается через правильное распределение аэродинамических сил и моментов по всей длине ракеты. Это позволяет управлять полётом и поддерживать ракету в желаемом положении, обеспечивая точность наведения на цель. Важными элементами стабилизации могут быть крылья, рулевые поверхности и динамическая устойчивость.

Для достижения высокой манёвренности ракеты важно обеспечить управляемость во всех фазах полёта. Аэродинамическая конфигурация должна позволять ракете изменять направление полёта, маневрировать вокруг препятствий и атаковать цель с различных углов. Это может быть достигнуто с помощью управляемых рулевых поверхностей, аэродинамических профилей и регулируемых узлов.

Современные противотанковые ракеты с головкой самонаведения имеют впечатляющие характеристики благодаря продвинутой аэродинамической конфигурации. Они способны поражать цели на значительных расстояниях с высокой точностью и преодолевать препятствия на своём пути [4]. Это делает их незаменимым оружием в современных военных конфликтах.

Однако, дальнейшее развитие аэродинамической компоновки противотанковых ракет все ещё является актуальной задачей. Новые технологии и исследования в области аэродинамики позволяют создавать более совершенные и эффективные ракеты. Оптимизация формы и профиля ракеты поможет снизить сопротивление воздуха и повысить эффективность полёта.

Существует несколько основных аспектов, которые способствуют достижению высокой эффективности противотанковых ракет через аэродинамику:

- минимизация аэродинамического сопротивления. Сопротивление воздуха является основным фактором, замедляющим ракету и ограничивающим ее дальность и скорость полёта. Путём оптимизации формы и профиля ракеты, а также использования специальных аэродинамических элементов, таких как крылья и рулевые поверхности, можно существенно снизить сопротивление воздуха и улучшить общую аэродинамическую эффективность;

- обеспечение стабильности полёта. Стабильность ракеты играет ключевую роль в точности поражения целей. Путём правильного распределения аэродинамических сил и моментов по всей длине ракеты, например, с помощью винтов или рулей, можно обеспечить стабильность полёта и точное наведение на цель [5];

- манёвренность ракеты. Противотанковые ракеты должны быть способны маневрировать во время полёта, чтобы обойти препятствия и успешно атаковать цель. Манёвренность достигается с помощью управляемых рулевых поверхностей или векторного управления тягой, что позволяет ракете изменять направление полёта и маневрировать вокруг препятствий.

Понимание аэродинамической компоновки противотанковых ракет является ключевым для разработки более эффективных и точных военных систем. Она помогает улучшить оперативные характеристики ракет и повысить их эффективность в различных боевых сценариях.

Одной из актуальных проблем, над которой ведутся исследования [6-10], является увеличение дальности и скорости полёта противотанковых ракет. Новые аэродинамические конфигурации и технологии позволяют сокращать сопротивление воздуха и увеличивать аэродинамическую эффективность, что в свою очередь способствует увеличению дальности полёта.

Точное измерение атмосферных показателей и учёт всех процессов, связанных с запуском и полётом противотанковой ракеты, является сложной задачей. Для поиска ответов на эти вопросы обычно используется моделирование – вычислительная

гидродинамика (англ. Computational fluid dynamics – CFD), также известной как метод численного моделирования и симуляции физических процессов при помощи специализированных программных инструментов, включая OpenFOAM [11], который является программным обеспечением с открытым исходным кодом, предназначенным для моделирования и анализа гидродинамических явлений [12].

Вычислительная гидродинамика (CFD) позволяет исследовать сложные течения, которые не могут быть аналитически решены, путём разбиения физических уравнений гидродинамики на дискретные уравнения и их последующего численного решения на компьютере [13]. Это позволяет получить детальную информацию о скоростях, давлениях, температурах и других свойствах жидкости или газа внутри и вокруг сложной геометрии.

Процесс моделирования аэродинамики противотанковой ракеты методом вычислительной гидродинамики (CFD) состоит из следующих этапов:

- определение трёхмерной геометрии противотанковой ракеты (размеры, форма, характеристики и т. д.). Это может быть выполнено с использованием компьютерного моделирования;

- определение физических условий: на этом этапе определяются физические условия внешней среды оказывающее действие на противотанковую ракету (начальная скорость ракеты, температура окружающей среды, атмосферное давление и другие факторы);

- дискретизация геометрии или создание сетки: геометрия ракеты разбивается на сетку, состоящую из ячеек или элементов;

- решение уравнений гидродинамики: на этом этапе уравнения гидродинамики, такие как уравнения Навье-Стокса, решаются программным способом для определения параметров потока вокруг ракеты. Это может быть выполнено с использованием метода анализа остатков (residuals);

- анализ и интерпретация результатов: полученные результаты анализируются и интерпретируются для получения информации о течении газовых потоков вокруг противотанковой ракеты.

### **Материалы и методы.**

В данной статье исследуются аэродинамические характеристики модели противотанковой ракеты с использованием программ FreeCAD для определения геометрии и физических границ исследуемого объекта, численного моделирования OpenFOAM для симуляции физических процессов (моделирование и предсказание течения газов) и графического пакета ParaView для интерактивной визуализации больших массивов данных для качественного и количественного анализа.

Аэродинамическая компоновка противотанковой ракеты имеет схему «поворотное крыло» состоит из следующих частей (график 1):

- корпус: является телом ракеты. Полый цилиндр. Предназначен для установки электронных систем управления и боевой части;

- обтекатель: находится в головной части ракеты. Сферической формы. Предназначен для более эффективной и точной работы системы наведения;

- воздушные рули: общее количество 8 штук, расположены около центра масс (ЦМ) и в хвостовой части корпуса ракеты под углом 45 градусов относительно друг друга. Предназначены для управления движением ракеты полете.

Определёнными преимуществами выбранного вида аэродинамической компоновки противотанковой ракеты являются высокая манёвренность при управлении и устойчивость в переходных режимах, характеризующаяся незначительной задержкой при выполнении команд управления и минимальными колебаниями [14].

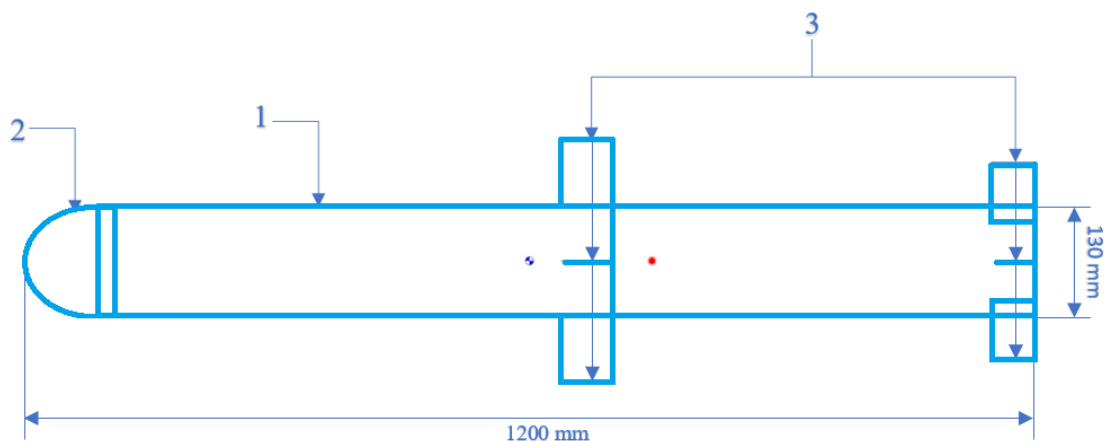


График 1 – Геометрия модели противотанковой ракеты: 1 - корпус, 2 - обтекатель, 3 - воздушные рули

Геометрические характеристики модели противотанковой ракеты показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Геометрические характеристики

Геометрическая характеристика	Значение
Длина	1200 мм
Диаметр	130 мм
Количество воздушных рулей	8
Размеры рулей (Длина×Ширина)	50×100 мм

3D-модель противотанковой ракеты была спроектирована с помощью программы графического моделирования твёрдых тел FreeCAD (график 2).

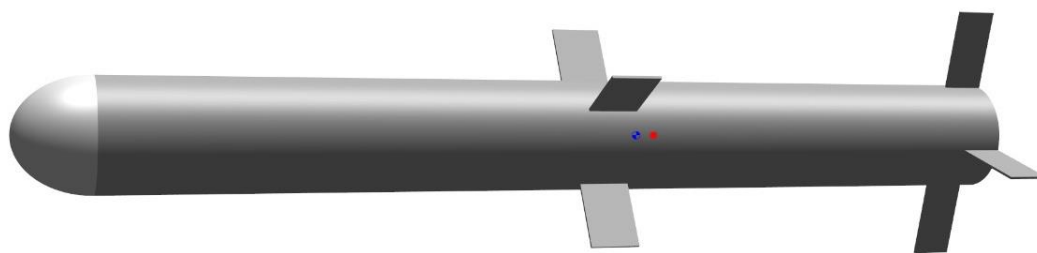


График 2 – 3D-модель противотанковой ракеты

### Результаты и обсуждения.

Перед началом моделирования необходимо создать сетку вокруг трёхмерной геометрии противотанковой ракеты в среде OpenFOAM для выполнения дальнейших расчётов. Суть моделирования состоит в массивном параллельном вычислении показателей скорости ( $U$ ) и давления ( $p$ ) методом анализа остатков (residuals) через множество дифференциальных уравнений для аппроксимации результатов и измерений.

В ходе исследования было произведено моделирование в среде OpenFOAM с двумя различными размерами ячеек сетки, а именно 5 мм и 10 мм.

Оба моделирования демонстрируют схожие тенденции в анализе остатков (residuals) для компонентов скорости ( $U_x, U_y, U_z$ ) и давления ( $p$ ). Остатки начинают колебаться примерно на 250 итерации и остаются относительно постоянными до 2000

итерации. Осцилляции сохраняются при значениях около  $10^{-2}$  для компонентов скорости и около  $10^{-1}$  для давления. Результаты приведены на графиках 3 и 4.

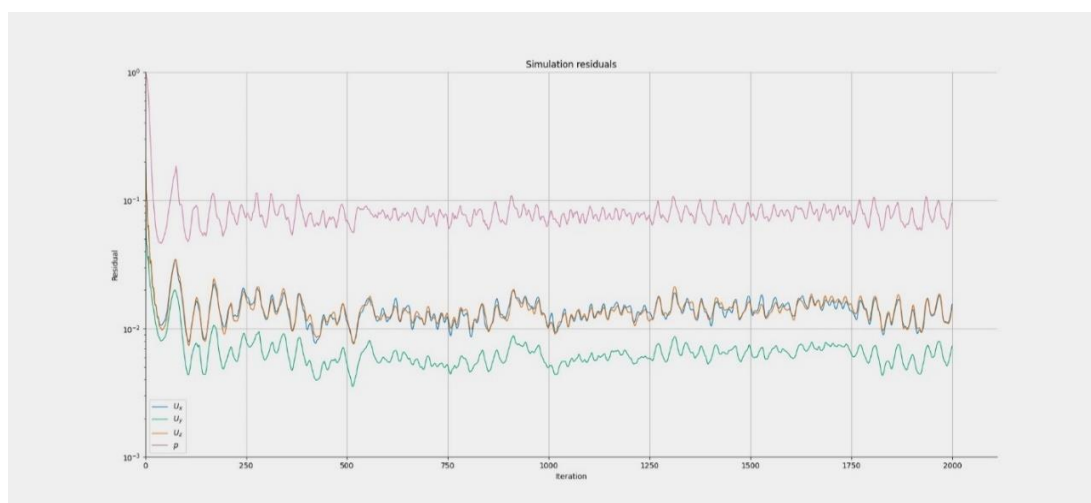


График 3 – Результаты вычислений для размера ячейки 10 мм

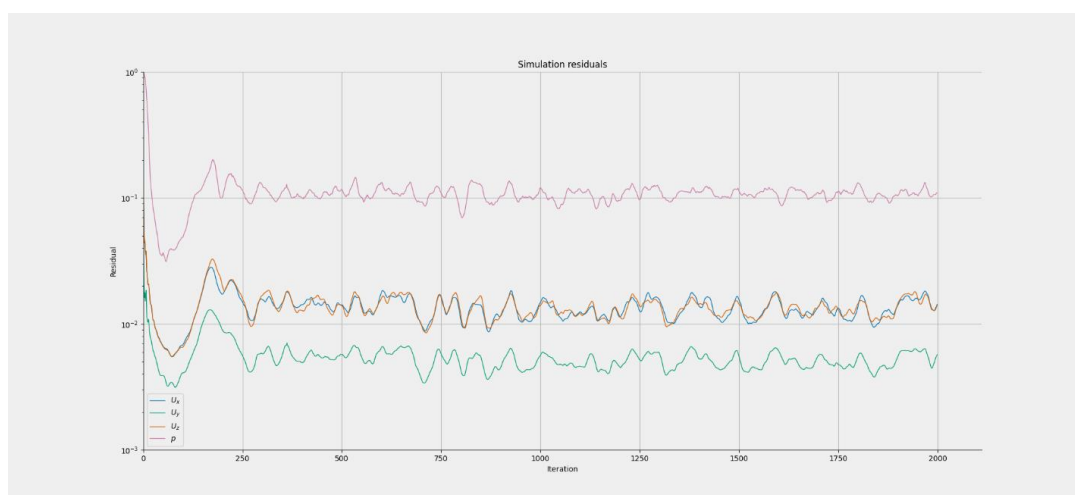


График 4 – Результаты вычислений для размера ячейки 5 мм

Осцилляция остатков указывает на то, что решение достигло устойчивого состояния, но ещё не полностью сходится. Такое поведение часто наблюдается при численном моделировании и может свидетельствовать о том, что решение приближается к устойчивому решению. Однако величина остатков указывает на то, что для достижения сходимости в пределах желаемого допуска требуются дополнительные итерации.

При сравнении двух размеров ячеек сетки поведение остатков оказывается одинаковым. Это указывает на то, что разрешение сетки, по крайней мере, от 5 до 10 мм, не оказывает существенного влияния на характер сходимости решения или на получаемые устойчивые значения. Схожие характеристики колебаний в обеих моделях позволяют предположить, что более грубая сетка (10 мм) может быть достаточной для захвата доминирующих особенностей потока вокруг противотанковой ракеты.

Моделирование с размером ячеек сетки 5 мм потребовало около 2 часов для достижения 2000 итераций, обеспечивая при этом такое же колебательное поведение в остатках, как и при моделировании с сеткой 10 мм. Это наблюдение показывает, что



увеличение разрешения сетки не обязательно приводит к улучшению сходимости, но значительно увеличивает вычислительные затраты. Следовательно, размер ячеек сетки 10 мм можно считать более эффективным выбором без ущерба для точности результатов.

Хотя остатки ещё не сошлись, устойчивое поведение, наблюдаемое с 250 по 2000 итераций, даёт ценное представление об аэродинамике противотанковой ракеты. Несмотря на колебания, результаты свидетельствуют о стабильном поле потока вокруг ракеты, что может помочь в понимании сил, действующих на ракету, и ее общих характеристик. Для достижения полной сходимости и точного определения аэродинамических параметров могут потребоваться дальнейшие итерации или доработка моделирующей установки.

Для визуализации и анализа воздушного потока вокруг ракеты использовался инструмент трассировки потока в ParaView. Используя облако точек диаметром 0,25 метра, 1000 точек и раскраску на основе параметра  $U$ , исследование было направлено на получение представления о характеристиках потока. Результаты приведены на графике 5.

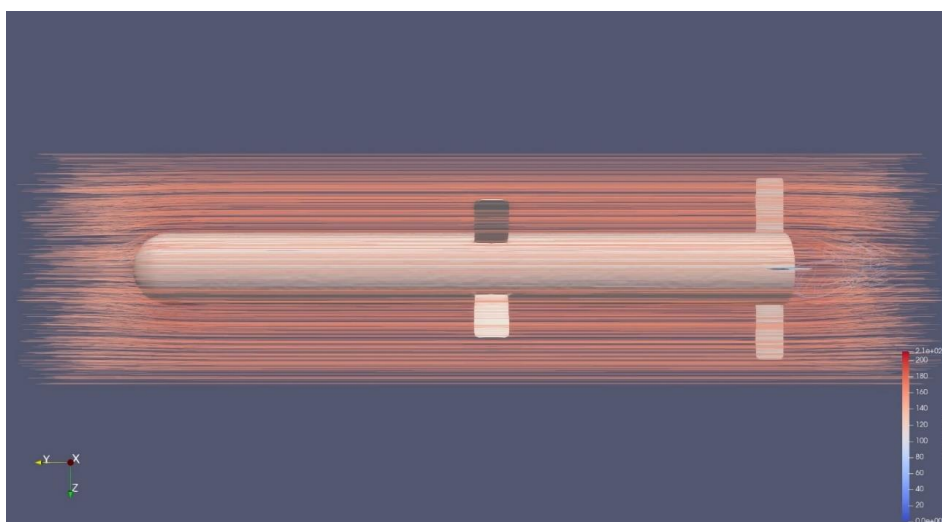


График 5 – Визуализация воздушного потока в ParaView

Визуализация трассировки потока выявила несколько существенных особенностей в структуре воздушного потока вокруг противотанковой ракеты. Скорость воздушного потока была установлена на 150 м/с, что соответствует средней скорости таких ракет. Масштаб окраски варьировался от 0 (синий) до  $2,1e+02$  (красный).

Большинство следов потока имеют прямую и красноватую окраску вдоль корпуса ракеты. Это говорит о наличии области высоких скоростей вокруг ракеты, на которую указывает красный цвет, соответствующий параметру  $U$ . Прямолинейный характер этих следов указывает на то, что воздушный поток вокруг ракеты относительно не нарушен, что способствует эффективной аэродинамической работе.

За ракетой на трассах потока наблюдаются вихревые потоки и голубоватая окраска. Это указывает на образование вихрей в области следа, где воздушный поток демонстрирует вращательное движение. Синий цвет представляет собой более низкие скорости по сравнению с высокоскоростной областью вдоль ракеты. Наличие вихреобразования и синего цвета указывает на образование следа за ракетой, что приводит к увеличению сопротивления воздуха.

Некоторые следы потока наблюдаются вокруг головки ракеты и имеют голубоватый цвет в центре головки ракеты. Это указывает на область более низких скоростей и уменьшенной интенсивности потока. Наличие более медленного потока вокруг головки ракеты может быть связано с изменением геометрии и возникающими

явлениями разделения потока. Синий цвет в центре головки ракеты указывает на более низкую скорость воздуха в этой области.

Прямые и красноватые следы потока вдоль корпуса ракеты указывают на наличие высокоскоростного воздушного потока, способствующего движению и устойчивости ракеты. Образование вихрей в области следа за ракетой предполагает возникновение аэродинамических явлений, таких как разделение потока и отрыв вихрей. Понимание этих явлений необходимо для минимизации сопротивления и оптимизации характеристик ракеты. Поток вокруг головной части ракеты, с более медленными скоростями и разделением потока, подчёркивает важность тщательного проектирования лобовой формы ракеты для минимизации сопротивления и поддержания стабильности.

### **Заключение.**

На основе метода вычислительной гидродинамики (CFD) и программных средств OpenFOAM и ParaView было проведено два моделирования аэродинамической компоновки противотанковой ракеты с различными размерами ячеек сетки 5 мм и 10 мм. Поведение сходимости значений аэродинамических характеристик оценивалось с помощью анализа остатков (residuals), который выявил устойчивые колебания при значениях 10–2 для компонентов скорости ( $U_x, U_y, U_z$ ) и 10–1 для давления ( $p$ ) от 250 до 2000 итераций.

Анализ остатков выявил колебательное поведение, указывающее на то, что решение достигло устойчивого состояния, но не полностью сходится в пределах наблюдаемого диапазона итераций. Это говорит о необходимости дополнительных итераций или корректировок для достижения сходимости и точной количественной оценки аэродинамических параметров.

Кроме того, визуализация потока с помощью трассировщиков потока (flow tracer) в ParaView выявила ключевые особенности:

- прямые следы потока (красный цвет) вдоль корпуса ракеты указывают на высокоскоростной воздушный поток, способствующий ее движению и устойчивости;
- наличие вихревых потоков (синий цвет) в области следа указывает на образование вихрей, подчёркивая возникновение явлений разделения потока и повышенного сопротивления воздуха;
- поток вокруг головной части ракеты, с более медленными скоростями и разделением потока, подчёркивает важность тщательного проектирования для минимизации сопротивления и обеспечения устойчивости.

Полученные результаты способствуют всестороннему пониманию аэродинамики противотанковой ракеты. Анализ остатков даёт представление о поведении и сходимости решения, а визуализация трассировки потока проясняет структуру воздушных потоков и их влияние на характеристики ракеты. Эти знания могут помочь в оптимизации будущей конструкции, что позволит разработать более эффективные и точные противотанковые ракеты.

**Финансирование.** В рамках проекта AP148052/0222 «Проектирование и разработка системы управления и наведения противотанковых ракетных комплексов».

## **ЛИТЕРАТУРА**

[1] Hamit Erdal, Kemal Gurol Kurtay, Hakan Ayhan Dagistanli, Aygun Altundas. Evaluation of Anti-Tank Guided Missiles: An integrated Fuzzy Entropy and Fuzzy CoCoSo multi criteria methodology using technical and simulation data. Applied Soft Computing, Volume 137, 2023, ISSN 1568-4946, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110145>

[2] Hashimov E. G., Karimov Y. Sh. THE ROLE OF MODERN ANTI-TANK MEANS IN THE WARS. Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління, Том 1, Секція 1, 2022, 5 с.

[3] P. Sethunathan, R. N Sugendran, T. Anbarasan. Aerodynamic Configuration Design of a Missile. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), ISSN: 2278-0181, Vol. 4 Issue 03, March-2015, 72 p.

[4] Al Fadli, Gunawan, Bura, Nugroho. DESIGN AND IMPLEMENTATION OF ANTI-TANK GUIDED-MISSILE (ATGM) CONTROL SYSTEM USING SEMI-AUTOMATIC COMMAND LINE OF SIGHT (SACLOS) METHOD BASED ON DIGITAL IMAGE PROCESSING/Jurnal Pertahanan, Vol. 7 No. 2 (2021), pp.217-231.

[5] S. J. Chang, Z. Y. Wang. Analysis of spin-rate property for dual-spin-stabilized projectiles with canards. Journal of Spacecraft and rockets, 2014, 51 (3): 958 - 966.

[6] Amandeep Singh. Aerodynamic analysis on missile design. International Journal of Scientific Development and Research (IJS DR), Volume 5 Issue 10, October 2020, pp.255-262.

[7] Hanzhou Wu<sup>1</sup>, Min Gao, Weidong Song, Zhao Jie, Yi Wang. Accuracy Analysis of Aerodynamic Calculation of Two-dimensional Ballistic correction Projectile based on Missile Datcom. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 612 (2019) 032096, doi:10.1088/1757-899X/612/3/032096.

[8] Chun-Chi Li, Wei-Chan Hong. A Study of Aerodynamic Characteristics of an Anti-tank Missile. Int'l Conference on Research & Innovation in Computer, Electronics and Manufacturing Engineering (RICEME-17) Feb. 2-3, 2017.

[9] N. Hamel, E. Gagnon. CFD and Parametric Study on a 155 mm Artillery Shell Equipped with a Roll-Decoupled Course Correction Fuse. 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference 27-30 June 2011, Honolulu, Hawaii.

[10] X. L. Ji, H. P. Wang, S. M. Zeng, D. G. Li. CFD Prediction of Longitudinal Aerodynamic for a Spinning Projectile with Fixed Canard. Journal of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(3): 265 – 268.

[11] Программное обеспечение OpenFOAM. Источник: <https://www.openfoam.com/>

[12] Goong Chen, Qingang Xiong, Philip J. Morris, Eric G. Paterson, Alexey Sergeev, Yi-Ching Wang. OpenFOAM for Computational Fluid Dynamics. Notices of the AMS, Volume 61, Number 4, April 2014, pp.354-363.

[13] H. K. Versteeg and W. Halalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method, 2nd ed., Pearson Prentice Hall, Harlow, UK, 2007.

[14] Мануйленко В. Г., Удин Е.Г., Теоретические основы крылатых управляемых ракет – СПб: Университет ИТМО, 2020. – 201 с.

**Нұрсұлтан Жетенбаев**, магистр, аға оқытушы, "Тұмар" инновациялық әзірлемелер орталығы, Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан, [nursultan.zhetenbaev@mail.ru](mailto:nursultan.zhetenbaev@mail.ru)

**Айдос Сұлтан**, докторант, "Тұмар" инновациялық әзірлемелер орталығы, Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан, [aiiddoss17@mail.ru](mailto:aiiddoss17@mail.ru)

**Абу-Алим Аязбай**, докторант, "Тұмар" инновациялық әзірлемелер орталығы, Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан, [work\\_abu@hotmail.com](mailto:work_abu@hotmail.com)

**Еркебұлан Нұрғизат**, докторант, "Тұмар" инновациялық әзірлемелер орталығы, Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан, [y.nurgizat@aes.kz](mailto:y.nurgizat@aes.kz)



**Жандос Кожабек**, докторант, "Тұмар" инновациялық әзірлемелер орталығы, Алматы, Қазақстан, z.kozhabek@aes.kz

## ТАНККЕ ҚАРСЫ ЗЫМЫРАНЫҢ АЭРОДИНАМИКАЛЫҚ ОРНАЛАСУЫН МОДЕЛЬДЕУ

**Аңдатпа** Бұл жұмыста сандық модельдеу әдісі негізінде танкке қарсы зымыран моделінің аэродинамикалық сипаттамаларын талдау ұсынылған – есептеу гидродинамикасы (ағылш. Computational fluid dynamics – CFD). Бұл зерттеу OpenFOAM-дағы физикалық процестерді модельдеу және ParaView-тегі ауа ағындарын бейнелеу әдісі арқылы танкке қарсы зымыран моделінің аэродинамикасы туралы құнды мәліметтер алуға мүмкіндік береді. Жылдамдық ( $U_x, U_y, U_z$ ) және қысым ( $p$ ) компоненттері үшін қалдықтарды талдау (residuals) әдісімен алынған нәтижелер оңтайлы аэродинамикалық өнімділікке (жылдамдық, диапазон, маневр) қол жеткізу үшін дизайнды Мұқият жобалаудың маңыздылығын көрсете отырып, танкке қарсы зымыранның аэродинамикасын түсінуге ықпал етеді.

**Түйінді сөздер.** Аэродинамика, танкке қарсы зымыран, аэродинамикалық орналасу, есептеу гидродинамикасы, сандық модельдеу, OpenFOAM, ParaView.

**Nursultan Zhetenbayev**, master, senior lecturer, Tumar Innovation Development Center, Almaty University of Energy and Communications named after G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan, nursultan.zhetenbaev@mail.ru

**Aidos Sultan**, doctoral student, Tumar Innovation Development Center, Almaty University of Energy and Communications named after G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan, aiiddoss17@mail.ru

**Abu Alim Ayazbay**, doctoral student, Tumar Innovation Development Center, Almaty University of Energy and Communications named after G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan, work\_abu@hotmail.com

**Yerkebulan Nurgizat**, doctoral student, Tumar Innovation Development Center, Almaty University of Energy and Communications named after G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan, y.nurgizat@aes.kz

**Zhandos Kozhabek**, doctoral student, Tumar Innovation Development Center, Almaty, Kazakhstan, z.kozhabek@aes.kz

## SIMULATION OF THE AERODYNAMIC LAYOUT OF AN ANTI-TANK MISSILE

**Abstract.** This paper presents an analysis of the aerodynamic characteristics of an anti-tank missile model based on the numerical simulation method – Computational fluid dynamics (CFD). This study provides valuable information about the aerodynamics of an anti-tank missile model by simulating physical processes in OpenFOAM and the method of visualizing air flows in ParaView. The results obtained using the residuals analysis method for the velocity ( $U_x, U_y, U_z$ ) and pressure ( $p$ ) components contribute to understanding the aerodynamics of an anti-tank missile, indicating the importance of careful design of the structure to achieve optimal aerodynamic characteristics (speed, range, maneuverability).

**Keywords.** Aerodynamics, anti-tank missile, aerodynamic layout, computational fluid dynamics, numerical modeling, OpenFOAM, ParaView.

\*\*\*\*\*