

Д.Б. Бегерський, к.т.н., доц.
І.В. Вітюк, асистент
О.А. Левківський, асистент
О.О. Багінський, асистент
А.О. Коваль, аспірант

Державний університет «Житомирська політехніка»

Незалежність динамічної сітки кінцевих елементів для розрахунків аеродинамічного опору магістральних автопоїздів

У статті досліджено вплив зміни максимального розміру кінцевого елемента динамічної сітки на точність обчислення сили аеродинамічного опору автопоїзда. Обчислення були виконані в середовищі Ansys Fluent, що дозволяє моделювати потоки повітря та їх взаємодію з об'єктами, зокрема з автопоїздом.

Для аналізу було створено кілька варіантів сіток кінцевих елементів з різною грануляцією. Кожна з сіток була адаптована для моделювання аеродинамічних характеристик при різних умовах руху та швидкості автопоїзда. Динамічна сітка була вибрана, оскільки вона дозволяє змінювати структуру сітки під час симуляції, що важливо для точного відображення складних аеродинамічних процесів, таких як турбулентні потоки і змінні шоки на поверхнях.

Для різних варіантів сітки проведено обчислення, починаючи з грубої сітки з великими елементами і поступово збільшуючи її точність до більш дрібних елементів. Під час кожного етапу обчислювалося значення сили аеродинамічного опору автопоїзда.

Особливу увагу приділено аналізу залежності точності результатів від кількості елементів у сітці. Це дозволило визначити, за якої кількості елементів досягається стабільність у результатах обчислень, а подальше збільшення кількості елементів не призводить до значного поліпшення точності. Застосування методів відбору оптимального розміру елемента дозволяє значно скоротити час обчислень, зберігаючи високу точність результатів. Також були розглянуті можливі методи оптимізації сітки для зменшення обсягу обчислювальних ресурсів при збереженні точності результатів. Це дослідження дає змогу визначити оптимальні параметри сітки для виконання аеродинамічних розрахунків автопоїздів, зокрема для оцінки аеродинамічного опору, що є важливим для покращення енергоефективності та зменшення витрат пального у транспортних системах.

Ключові слова: автопоїзд; сила опору повітря; аеродинаміка; комп'ютерне моделювання; витрата пального.

Незалежність сітки є критично важливим аспектом при проведенні числових досліджень аеродинаміки, зокрема для моделювання аеродинамічного опору магістральних автопоїздів. Важливість цього поняття полягає в тому, що результат числових симуляцій може значно залежати від якості та параметрів використовуваної сітки.

Сітка є основою для розв'язання рівнянь, що описують аеродинамічні процеси. Від її розміру, структури та рівня деталізації залежать точність і стійкість отриманих результатів. Якщо сітка не є незалежною, тобто якщо її параметри (розмір елементів, розподіл, грануляція) впливають на результат, це може призвести до помилок у оцінках аеродинамічних характеристик, таких як сила опору, коефіцієнт аеродинамічного підйому чи турбулентні характеристики потоку.

Однією з основних цілей дослідження незалежності сітки є пошук такого розміру елементів сітки, за якого результат моделювання стабільний і не змінюється при подальшому доопрацюванні сітки, що забезпечує точність і надійність отриманих даних. Це дозволяє уникнути помилок, які можуть виникати внаслідок числових нестабільностей або надмірної деталізації, що призводить до високих обчислювальних витрат без істотного покращення точності результатів.

У контексті дослідження аеродинамічних характеристик автопоїздів незалежність сітки також важлива для забезпечення адекватного відображення складних потокових процесів, таких як турбулентність, аеродинамічні шоки або зміни в потоку при різних швидкостях. Неправильна сітка може призвести до неправильних прогнозів щодо енергоефективності транспорту або занижених / завищених оцінок аеродинамічного опору, що своєю чергою може вплинути на розрахунки споживання пального та оптимізацію дизайну автопоїздів.

Загалом забезпечення незалежності сітки є важливою умовою для отримання точних, стійких та економічно ефективних результатів, що сприяє поліпшенню проектування аеродинамічних характеристик та підвищенню ефективності транспортних засобів.

Актуальність теми. Актуальність досліджень, присвячених незалежності сітки кінцевих елементів в аеродинамічних розрахунках, зокрема для магістральних автопоїздів, безпосередньо пов'язана з декількома важливими аспектами, які впливають на точність, економічність і ефективність сучасних транспортних систем. Незалежність сітки є основою для забезпечення точності аеродинамічних розрахунків. Без проведення тесту незалежності сітки існує ризик того, що результати симуляцій можуть бути неточними через вибір неправильного розміру елементів або некоректну топологію сітки. Ці помилки можуть призвести до значних розбіжностей у прогнозах, таких як визначення аеродинамічного опору або аеродинамічного підйому автопоїздів, що своєю чергою негативно позначається на ефективності їх роботи. Однією з причин, чому ці дослідження є актуальними, є необхідність оптимізації часу обчислень та витрат на обчислювальні ресурси. У разі, якщо сітка не є незалежною, обчислення можуть займати значний час через надмірну деталізацію сітки, що не дає додаткової точності. Визначення оптимального розміру елементів сітки дозволяє скоротити обчислювальні витрати без втрати точності результатів, що особливо важливо для промислових розрахунків. Аеродинамічні характеристики автопоїздів є критично важливими для їх ефективності. Від точності визначення аеродинамічного опору залежить енергоефективність транспорту, а також його споживання палива. Проведення дослідження незалежності сітки під час моделювання аеродинамічних властивостей автопоїздів дає можливість оптимізувати аеродинамічні властивості транспортних засобів з метою зниження витрати палива, зменшення викидів шкідливих речовин та збереження довкілля. Це особливо важливо в контексті глобальних зусиль щодо зменшення викидів CO₂ та покращення екологічної ефективності транспортних засобів. Технології числового моделювання аеродинаміки постійно розвиваються, і з кожним роком створюються нові методи та інструменти для виконання більш точних розрахунків. Однак будь-яка нова технологія вимагає тестування її на стабільність і точність результатів. Тому проведення досліджень незалежності сітки стає важливим етапом моделювання аеродинамічних властивостей автопоїздів для підтвердження відповідності моделей вимогам реальних інженерних задач. Ці дослідження мають велике значення не лише для наукових цілей, але й для практичного застосування у промисловості. Наприклад, для розробників нових моделей поїздів, транспортних засобів чи навіть аерокосмічних апаратів важливо забезпечити високий рівень точності при прогнозуванні аеродинамічних характеристик (рис. 1).

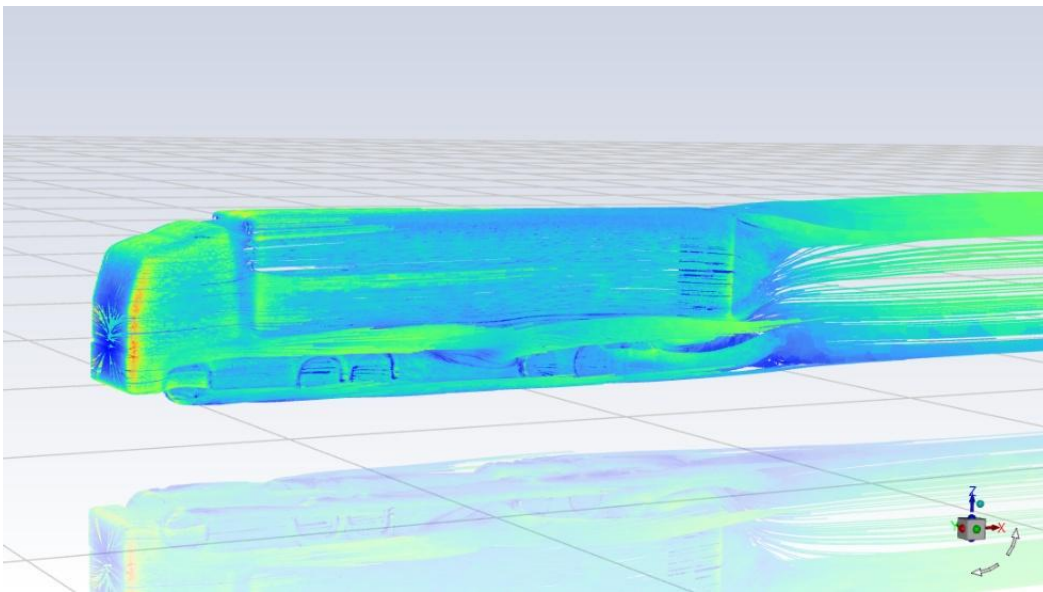


Рис. 1. Потoki повітря при дослідженні аеродинаміки автопоїзда

Оскільки промислові розрахунки часто мають велику кількість змінних і складних параметрів, використання динамічної сітки з підтвердженою незалежністю дозволяє отримати надійні результати з меншими витратами, що є критично важливим для прийняття технічних рішень на етапі проектування. Точні аеродинамічні моделі мають важливе значення для встановлення галузевих стандартів і нормативів, наприклад, для визначення вимог до енергоефективності транспортних засобів, нормування витрати палива та ін. Використання моделей з динамічними сітками з підтвердженою незалежністю може забезпечити необхідну основу для розробки цих стандартів і гарантувати, що результати, отримані за допомогою цих моделей, відповідають реальним умовам та є надійними для використання в промисловості.

Таким чином, дослідження незалежності динамічних сіток кінцевих елементів для моделювання аеродинамічних властивостей транспортних засобів мають суттєву актуальність для сучасної науки та промисловості, оскільки дозволяють підвищити точність, ефективність та економічність моделювання під час проектування транспортних систем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Дослідження незалежності сітки є критичним етапом у числових аеродинамічних дослідженнях, оскільки дозволяє визначити, за якої грануляції сітки результати симуляцій стабілізуються і більше не змінюються при подальшому її доопрацюванні. Це забезпечує точність і надійність отриманих даних [1].

У [2], присвяченій аналізу впливу грануляції сітки на аеродинамічні характеристики, було показано, що навіть при високій роздільній здатності сітки результати можуть суттєво змінюватися залежно від топології сітки, зокрема в областях, де спостерігаються аеродинамічні шоки або турбулентні потоки.

Практичне проведення досліджень незалежності сітки [3] включає створення кількох варіантів сіток з різною кількістю елементів, виконання симуляцій для кожної сітки та порівняння отриманих результатів. Це дозволяє визначити оптимальні характеристики сітки, за яких результати стабілізуються і більше не змінюються при подальшому її доопрацюванні.

У [4], присвяченій моделюванню аеродинамічних характеристик моделі поїзда, було проведено аналіз впливу грануляції сітки на результати симуляцій. Показано, що результати симуляцій залежать не лише від роздільної здатності сітки, а й від її топології, зокрема в областях, де спостерігаються аеродинамічні удари або турбулентні потоки.

Метою статті є оцінка впливу розміру максимального елемента динамічної сітки на точність визначення сили аеродинамічного опору магістральних автопоїздів у середовищі Ansys Fluent, а також визначення оптимальних параметрів сітки для досягнення стабільних і точних результатів у числових аеродинамічних розрахунках.

Викладення основного матеріалу. Методи дослідження незалежності сітки кінцевих елементів є ключовими для оцінки точності результатів, отриманих за допомогою чисельних методів, таких як метод кінцевих елементів (МКЕ). Незалежність сітки означає, що зміни в кількості елементів або їх розмірах не призводять до істотних змін у результатах розрахунку. Це важливо для забезпечення надійних і точних результатів у таких складних задачах, як аеродинамічні розрахунки магістральних автопоїздів. Метод поступового збільшення кількості елементів (mesh refinement) є одним із основних підходів для перевірки незалежності результатів від характеристик сітки в методі кінцевих елементів. Цей метод є дуже важливим для оцінки точності розрахунків, особливо в складних задачах, таких як аеродинамічне моделювання.

Основна ідея методу полягає в тому, щоб спочатку створити сітку з великими елементами, а потім поступово її уточнювати, зменшуючи розмір елементів. На початковому етапі використовуються великі елементи, що дає загальне уявлення про поведінку системи, але без високої точності. Потім зменшується розмір елементів (наприклад, розмір елементів зменшується вдвічі), що дає можливість більш детально врахувати характеристики поля (наприклад, в області високих градієнтів, таких як область біля об'єкта, що рухається).

Після того, як проведено розрахунки для кількох варіантів сітки, варто провести порівняння результатів. Основним критерієм для визначення незалежності сітки є конвергенція результатів. Це означає, що зміни в результатах при подальшому уточненні сітки мають бути незначними. Якщо різниця між результатами для сіток різної детальності (менші розміри елементів) залишається дуже малою, можна зробити висновок, що сітка достатньо точна і результати розрахунків стали незалежними від її розміру.

Водночас метод поступового збільшення кількості кінцевих елементів має ряд переваг та недоліків. До переваг можна зарахувати:

- простоту – метод є досить простим і зручним для перевірки точності розрахунків;
- забезпечення точності – дає можливість отримати точні результати при мінімальних обчислювальних витратах, обираючи найефективнішу сітку.

Метод поступового збільшення кількості кінцевих елементів має такі недоліки:

- часозатратність – поступове уточнення сітки може бути дуже часозатратним, особливо для великих моделей;

- обмеження на складність моделі – у деяких випадках, коли модель дуже складна або містить багато деталей, процес уточнення сітки може стати занадто важким і потребувати значних ресурсів.

У контексті аеродинамічних розрахунків магістральних автопоїздів метод поступового збільшення кількості елементів особливо важливий для вивчення характеристик повітряного потоку навколо транспортного засобу. Оскільки аеродинамічний опір та інші характеристики можуть сильно залежати від деталей потоку в безпосередній близькості до автопоїзда, важливо використовувати сітку, яка зберігає точність, але не займає надміру обчислювальних ресурсів.

Використання динамічної сітки в чисельних розрахунках аеродинаміки магістральних автопоїздів є важливим етапом, який дозволяє забезпечити точність результатів у випадках, коли об'єкт знаходиться в

русі або взаємодіє з потоком, що змінюється в часі. Динамічна сітка – це тип сітки, яка може змінювати свою форму або розмір елементів під час розрахунків, що дає можливість адаптувати її до змінних умов. Це особливо корисно під час моделювання взаємодії транспортного засобу з навколишнім середовищем, адже рух автопоїзда змінює аеродинамічні умови навколо нього.

У цьому дослідженні використовувалась динамічна сітка, що представлена на рисунку 2.

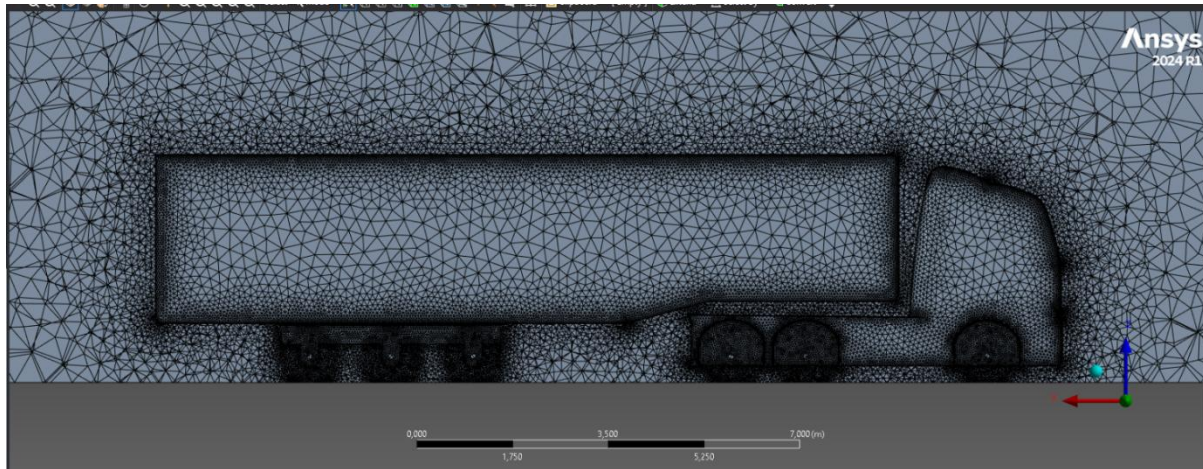


Рис. 2. Динамічна сітка

Використання динамічної сітки дає можливість точно моделювати змінні потоки повітря, що виникають під час руху транспортного засобу. Це дозволяє враховувати такі ефекти, як завихрення, турбулентність і різноманітні зміни в аеродинамічному полі, які можуть виникати через різні швидкості і кути атаки, коли об'єкт змінює свою позицію або рухається по різних ділянках дороги. Звичайні статичні сітки не дозволяють врахувати ці зміни, тому динамічна сітка стає необхідною для точного моделювання таких складних явищ.

Завдяки використанню динамічної сітки можна не лише відтворювати рух об'єкта, але й адаптувати сітку до різних умов потоку, зокрема уточнювати її в зонах високих градієнтів швидкості або тиску. Це дозволяє точніше розраховувати аеродинамічний опір та інші важливі параметри, що змінюються залежно від швидкості і характеристик потоку повітря. Зокрема, в моделях для магістральних автопоїздів, де аеродинамічний опір є важливим фактором для оцінки ефективності та економічності транспортних засобів, динамічна сітка дозволяє досягти високої точності результатів.

Використання динамічної сітки кінцевих елементів має кілька переваг, зокрема дозволяє адаптуватися до складних умов, коли об'єкт знаходиться в русі, що забезпечує високий рівень точності в розрахунках. Крім того, за допомогою динамічної сітки можна зосереджувати обчислювальні ресурси в найбільш важливих зонах, зменшуючи кількість елементів у інших частинах моделі, що дозволяє знизити обчислювальну складність при збереженні точності.

Для перевірки впливу розміру сітки на точність результатів моделювання було проведено серію симуляцій із поступовим зменшенням максимального розміру кінцевого елемента. Залежність сили аеродинамічного опору від кількості елементів у сітці наведено у таблиці 1 та на рисунку 3. Як видно з графіка, при зменшенні розміру елемента сітки сила опору поступово зменшується до певного моменту, після чого починає зростати. Це може свідчити про досягнення певного рівня точності, за яким подальше уточнення сітки не призводить до покращення результатів, а навпаки може негативно вплинути на числову стабільність чи точність розрахунку.

Результати демонструють, що для розміру сітки 0,5 м та кількості елементів близько 3,7 млн спостерігається мінімальна сила опору (табл. 1).

Таблиця 1

Параметри дослідження незалежності сітки кінцевих елементів моделі автопоїзда

№	Розмір елемента (м)	Кількість елементів	Сила опору (Н)
1	3,4	1 911 856	2562,99
2	2	1 927 403	2525,81
3	1	2 110 168	2470,82
4	0,5	3 662 970	2269,10
5	0,25	16 338 613	2378,19

Подальше уточнення до 0,25 м (понад 16 млн елементів) призвело до деякого збільшення сили опору, що може бути пов'язане з чисельними похибками або впливом інших параметрів симуляції (рис. 3).



Рис. 3. Залежність сили опору від кількості елементів сітки

Таким чином, для подальших досліджень доцільно обрати сітку з розміром елемента 0,5 м як компроміс між точністю та обчислювальними витратами (рис. 4).

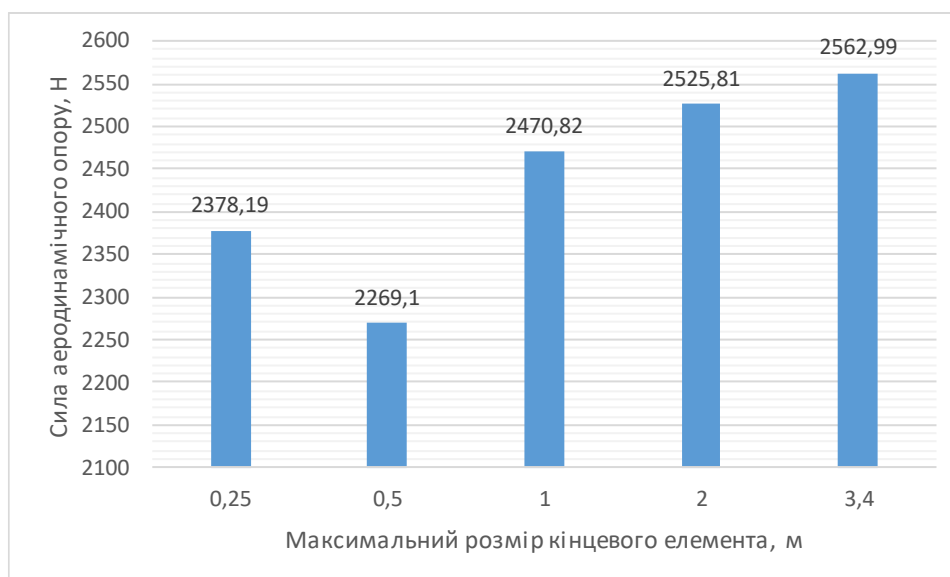


Рис. 4. Залежність сили аеродинамічного опору від розміру елемента сітки

Як видно з графіка, зі зменшенням максимального розміру елементів відбувається зниження значення сили аеродинамічного опору. Найбільша зміна спостерігається між найгрубішими сітками, що свідчить про суттєвий вплив сітки на точність результатів у цих випадках. Надалі, при подрібненні сітки до 0,5 м і менше, зміни у силі опору стають менш значущими – різниця між 0,5 м та 0,25 м становить менш як 5 %.

Таким чином, можна стверджувати, що при максимальному розмірі елемента 0,5 м сітка досягає умовної незалежності: подальше зменшення розміру елементів майже не впливає на результат, але значно збільшує обчислювальні ресурси. Тому для наступних етапів дослідження рекомендовано використовувати динамічну сітку з максимальним розміром елемента 0,5 м як оптимальну за співвідношенням точності та ефективності.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Використання динамічної сітки кінцевих елементів при дослідженні аеродинамічного опору автопоїздів дає можливість зменшення необхідної для

проведення моделювання розрахункової потужності. Проведений аналіз впливу грануляції сітки підтвердив, що зі зменшенням розміру максимального елемента сітки результати розрахунків аеродинамічного опору стають більш стабільними та точними. При певному рівні деталізації подальше зменшення розміру елементів вже не дає суттєвого приросту точності, що свідчить про досягнення незалежності сітки кінцевих елементів. Максимальний розмір елемента сітки суттєво впливає на формування обтікання автопоїзда, особливо в зонах з високими градієнтами тиску та швидкості – у передній частині кабіни, у проміжку між задньою стінкою кабіни і передньою стінкою напівпричепа та за хвостовою частиною. Вибір недостатньо детальної сітки в цих зонах призводить до спотворення результатів.

Порівняння кількох варіантів сітки показало, що оптимальна конфігурація – це така, що забезпечує сталі значення аеродинамічного опору при збільшенні кількості елементів не більше ніж на 3–5 %. Це дозволяє уникнути надмірних обчислювальних витрат без втрати якості моделювання. З отриманих результатів випливає, що для випадку розглянутої моделі автопоїзда подальше моделювання доцільно проводити з динамічною сіткою з 3 662 970 кінцевими елементами та максимальним розміром кінцевого елемента 0,5 м.

Список використаної літератури:

1. Mavriplis D. Unstructured mesh algorithms for aerodynamic calculations / D.Mavriplis, M.Napolitano, F.Sabetta // Thirteenth International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics : Lecture Notes in Physics. – Berlin, Heidelberg : Springer, 2005. – Vol. 414. – P. 57–77.
2. Sadrehaghighi I. Mesh Sensitivity & Mesh Independence Study / I.Sadrehaghighi // CFD Open Series. – Annapolis, MD, 2021. – 56 p.
3. Assessment of the mesh refinement influence on the computed flow-fields about a model train in comparison with wind tunnel measurements / K.Weinman, M.Fragner, R.Deiterding and other // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2018. – Vol. 179. – P. 102–117. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.05.005.
4. Дослідження аеродинамічних показників автопоїзда методом фізичного моделювання / Є.Г. Опанасюк, Д.Б. Бегерський, М.М. Можаровський, О.Є. Опанасюк // Вісник ЖДТУ. Серія : Технічні науки. – 2019. – Вип. 1 (83). – С. 25–34. DOI: 10.26642/tn-2019-1(83)-25-34.
5. Бегерський Д.Б. Залежність витрати пального від аеродинаміки автопоїзда / Д.Б. Бегерський, І.В. Вітюк, А.О. Коваль // Технічна інженерія. – 2023. – Вип. 2 (92). – С. 3–8. DOI: 10.26642/ten-2023-2(92)-3-8.
6. Вплив геометричних параметрів автопоїзда на його аеродинамічні характеристики / Д.Б. Бегерський, С.В. Цимбал, І.В. Вітюк, А.О. Коваль // Вісник машинобудування та транспорту. – 2023. – Т. 18, № 2. – С. 10–15. DOI: 10.31649/2413-4503-2023-18-2-10-15.
7. Josefsson E. Examination of robustness and accuracy of CFD simulations for external aerodynamics of commercial vehicles : Master's thesis / E.Josefsson ; Department of Mechanics and Maritime Sciences Division of Vehicle Engineering and Autonomous Systems Chalmers University of Technology. – Göteborg, Sweden, 2019. – 89 p. [Electronic resource]. – Access mode : <https://odr.chalmers.se/items/98b2a810-776b-4474-bc09-28043fba30a8>.
8. Аверишин А.Г. Вдосконалення аеродинамічних характеристик автомобілів для спорту методами чисельного і натурного експерименту : дис. ... канд. тех. наук : 05.22.02 / А.Г. Аверишин. – Харків, 2018. – 179 с.
9. Експрес-методика вимірювання місцевої швидкості потоку в аеродинамічній трубі малих дозвукових швидкостей / Е.А. Українець, В.В. Василенко, І.В. Романенко, І.О. Коломієць // Системи озброєння і військова техніка. – 2014. – № 1. – С. 242–247.
10. Numerical Study on Aerodynamic Drag Reduction of Racing Cars / R.Hassan, T.Islam, M.Ali, Q.Islam // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 90. – P. 308–313.
11. Дослідження аеродинамічних показників вантажного автопоїзда за допомогою комп'ютерного моделювання / М.М. Нестеренко, І.В. Жила, Д.С. Кашуба, І.А. Марченко // Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво. – 2022. – Вип. 1 (58). – С. 5–10.
12. Nasir M. A Comparative Analysis of a Scaled Car Model To Determine Drag Effects Using Wind Tunnel and CFD / M.Nasir. – 2023. – 7 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.10807.50087.

References:

1. Mavriplis, D., Napolitano, M. and Sabetta, F. (2005), «Unstructured mesh algorithms for aerodynamic calculations», *Thirteenth International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics*, Lecture Notes in Physics, Springer, Berlin, Heidelberg, Vol. 414, pp. 57–77.
2. Sadrehaghighi, I. (2021), «Mesh Sensitivity & Mesh Independence Study», *CFD Open Series*, Annapolis, MD, 56 p.
3. Weinman, K., Fragner, M., Deiterding, R. et al. (2018), «Assessment of the mesh refinement influence on the computed flow-fields about a model train in comparison with wind tunnel measurements», *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 179, pp. 102–117, doi: 10.1016/j.jweia.2018.05.005.
4. Opanasiuk, Ye.H., Beherskyi, D.B., Mozharovskiy, M.M. and Opanasiuk, O.Ie. (2019), «Doslidzhennia aerodynamichnykh pokaznykiv avtopoizda metodom fizychnoho modeliuvannia», *Visnyk ZhDTU. Seriya. Tekhnichni nauky*, Issue 1 (83), pp. 25–34, doi: 10.26642/tn-2019-1(83)-25-34.
5. Beherskyi, D.B., Vitiuk, I.V. and Koval, A.O. (2023), «Zalezhnist vytraty palnoho vid aerodynamiky avtopoizda», *Tekhnichna inzheneriia*, Issue 2 (92), pp. 3–8, doi: 10.26642/ten-2023-2(92)-3-8.

6. Beherskyi, D.B., Tsymbal, S.V., Vitiuk, I.V. and Koval, A.O. (2023), «Vplyv heometrychnykh parametriv avtopoizda na yoho aerodynamichni kharakterystyky», *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*, Vol. 18, No. 2, pp. 10–15, doi: 10.31649/2413-4503-2023-18-2-10-15.
7. Josefsson, E. (2019), «Examination of robustness and accuracy of CFD simulations for external aerodynamics of commercial vehicles», Master's thesis, Department of Mechanics and Maritime Sciences Division of Vehicle Engineering and Autonomous Systems Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 89 p., [Online], available at: <https://odr.chalmers.se/items/98b2a810-776b-4474-bc09-28043fba30a8>
8. Avershyn, A.H. (2018), «Vdoskonalennia aerodynamichnykh kharakterystyk avtomobiliv dlia sportu metodamy chyselnoho i naturnoho eksperymentu», Ph.D. Thesis of dissertation, 05.22.02, Kharkiv, 179 p.
9. Ukrainets, E.A., Vasylenko, V.V., Romanenko, Y.V. and Kolomiets, Y.O. (2014), «Ekspres-metodyka vymiriuvannia mistsevoi shvydkosti potoku v aerodynamichnii trubi malykh dozvukovykh shvydkostei», *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, No. 1, pp. 242–247.
10. Hassan, R., Islam, T., Ali, M. and Islam, Q. (2014), «Numerical Study on Aerodynamic Drag Reduction of Racing Cars», *Procedia Engineering*, Vol. 90, pp. 308–313.
11. Nesterenko, M.M., Zhyla, I.V., Kashuba, D.S. and Marchenko, I.A. (2022), «Doslidzhennia aerodynamichnykh pokaznykiv vantazhnoho avtopoizda za dopomohoiu kompiuternoho modeliuvannia», *Zbirnyk naukovykh prats. Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*, Issue 1 (58), pp. 5–10.
12. Nasir, M. (2023), «A Comparative Analysis of a Scaled Car Model To Determine Drag Effects Using Wind Tunnel and CFD», 7 p., doi: 10.13140/RG.2.2.10807.50087.

Бегерський Дмитро Богданович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-8357-0038>.

Наукові інтереси:

- прохідність автомобілів;
- моделювання транспортних потоків;
- аеродинаміка автопотягів.

E-mail: begerskiy@gmail.com.

Вітюк Іван Васильович – асистент кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-3577-8758>.

Наукові інтереси:

- транспортна логістика;
- експлуатаційні властивості автомобілів;
- аеродинаміка автопотягів.

E-mail: vnvik74@gmail.com.

Левківський Олександр Анатолійович – асистент кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-2706-3629>.

Наукові інтереси:

- підвищення ефективності експлуатації автомобільного транспорту;
- надійність автотранспортних засобів;
- аеродинаміка автопотягів.

E-mail: amts_loa@ztu.edu.ua.

Багінський Олександр Олександрович – асистент кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-0272-3707>.

Наукові інтереси:

- енергозберігаючі технології на автомобільному транспорті;
- сертифікаційні випробування автотранспорту.

E-mail: katt_boa@ztu.edu.ua.

Коваль Андрій Олегович – аспірант кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-6587-5914>.

Наукові інтереси:

- аеродинаміка автопотягів;
- експлуатаційні властивості автомобілів.

E-mail: asp_kao@student.ztu.edu.ua.

Beherskyi D.B., Vitiuk I.V., Levkivskyi O.A., Bahinskyi O.O., Koval A.O.

Independence of the dynamic grid of finite elements for the calculation of the aerodynamic resistance of linehaul trains

The article investigates the effect of changing the maximum size of the finite element of the dynamic grid on the accuracy of calculating the aerodynamic drag force of a linehaul train. The calculations were performed in the Ansys Fluent environment, which allows modeling air flows and their interaction with objects, in particular with a linehaul train.

Several variants of finite element grids with different granulations were created for the analysis. Each of the grids was adapted to simulate aerodynamic characteristics under different conditions of movement and speed of the linehaul train. The dynamic grid was chosen because it allows changing the grid structure during simulation, which is important for accurately reflecting complex aerodynamic processes, such as turbulent flows and variable shocks on surfaces.

Calculations were performed for different grid variants, starting with a coarse grid with large elements and gradually increasing its accuracy to finer elements. At each stage, the value of the aerodynamic drag force of the linehaul train was calculated.

Particular attention was paid to the analysis of the dependence of the accuracy of the results on the number of elements in the grid. This made it possible to determine at what number of elements stability is achieved in the calculation results, and a further increase in the number of elements does not lead to a significant improvement in accuracy. The use of methods for selecting the optimal element size allows us to significantly reduce the calculation time, while maintaining high accuracy of the results. Possible methods of optimizing the grid were also considered to reduce the amount of computing resources while maintaining the accuracy of the results. This study allows determining the optimal grid parameters for performing aerodynamic calculations of linehaul trains, in particular for estimating aerodynamic drag, which is important for improving energy efficiency and reducing fuel consumption in transport systems.

Keywords: linehaul train; air resistance force; aerodynamics; computer modeling; fuel consumption.

Стаття надійшла до редакції 28.04.2025.