

ТЕРМОГРАФІЧНА ДІАГНОСТИКА АЕРОДИНАМІКИ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТУ ПІД ЧАС
ЇХ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ДИЗАЙНУTHERMOGRAPHIC DIAGNOSTICS OF AERODYNAMICS OF TRANSPORT MODELS DURING
THEIR CONCEPTUAL DESIGN

Кузьмінець Микола Петрович, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри комп'ютерної, інженерної графіки та дизайну, kuzminecmp@ukr.net, тел. +380442849713,

<https://orcid.org/0000-0002-9636-919X>



Дубовенко Юрій Іванович, кандидат фізико-математичних наук, Національний транспортний університет, доцент кафедри комп'ютерної, інженерної графіки та дизайну, nemishayeve@ukr.net, тел. +380665979384,

<https://orcid.org/0000-0002-8128-5989>

Анотація. Представлено результати дослідження аеродинаміки твердотільних моделей транспортних засобів за допомогою термографічної діагностики. Обґрунтовано доцільність використання портативного тепловізора Flir One Pro у поєднанні зі смартфоном як доступного мобільного інструменту для аналізу теплових полів, що виникають під час обдуву моделей гарячим повітрям. Методика полягає у нагріванні поверхні зразків будівельним феном і подальшій візуалізації розподілу температури у вигляді теплових карт, які з певними припущеннями відображають зони підвищеного аеродинамічного опору. Об'єктами досліджень є масштабні моделі автобуса та безпілотних літальних апаратів, виготовлені з пінополістиролу та пластиліну. Якісний аналіз теплових зображень дозволив визначити проблемні ділянки лобового опору, пов'язані з геометричними особливостями формотворення, зокрема спереду корпусу, у вузлах переходу крила до фюзеляжу та виступаючих елементах. Наведено приклади оптимізації конструкцій шляхом зміни конфігурації носових частин, зменшення об'ємності кабін, згладження контуру корпусів та модифікації обтічників. Отримані результати доводять, що і в польових умовах дизайнер може отримати оперативний наочний «зворотний зв'язок» щодо ефективності концептуальних рішень без використання аеродинамічних труб. Методика придатна для ітеративного вдосконалення форм транспортних засобів на ранніх етапах проектування, коли критичними є ресурсозбереження та швидкість реалізації. Висвітлено потенціал поєднання термографії з комп'ютерним моделюванням (SolidWorks, T-Flex, Elcut) для створення енергоефективних та ергономічних транспортних концептів. Стаття заповнює прогалину у літературі, де бракувало опису використання термографічних методів у концептуальному дизайні транспорту, та окреслює напрям інтеграції тепловізійних технологій у практику промислового дизайну.

Ключові слова: Моделювання, термографія, тепловізійне зображення, аеродинамічний опір, портативний тепловізор, концептуальне проектування, БПЛА, модель автобуса.

Вступ: Імітаційне моделювання – це метод дослідження, заснований на тому, що система, яка вивчається, замінюється *імітатором* і з ним проводять експерименти з метою отримання інформації про цю систему. Експериментування з імітатором називають *імітацією* (імітація – це виявлення суті

явища, не вдаючись до експериментів на реальному об'єкті). Досліджувана система замінюється моделлю (як правило, в значно меншому масштабі), яка достатньо точно описує реальну систему, над нею проводять експерименти з метою отримання інформації про цю систему. До імітаційного моделювання вдаються, коли: дорого або неможливо експериментувати на реальному об'єкті; неможливо збудувати аналітичну модель; необхідно імітувати поведінку системи в часі. Мета імітаційного моделювання полягає у відтворенні поведінки досліджуваної системи на основі результатів аналізу істотних взаємозв'язків між її елементами (симуляція предметної області для проведення експериментів). Імітаційне моделювання поділяється на *дискретне*, *агентне* і *систему динаміку*. В техніці, у тому числі для моделювання транспортних технологій і виробничих процесів найчастіше застосовують дискретне моделювання. Воно абстрагується від неперервної природи явищ і розглядає основні події моделюваної системи: очікування, обробка, рух, розвантаження тощо.

В транспортній техніці, *імітаційні моделі* у визначеному масштабі (1:10, 1:20, 1:25 тощо) створюють зі спеціальних матеріалів для формотворення. Щоб оцінити *аеродинамічну* ефективність форми, моделі піддають випробуванню в промисловій *аеродинамічній трубі*. В разі недоступності промислового зразка його замінюють самотужки виготовленим зменшеним аналогом, а генератор вітрового потоку замінюють на *будівельний фен*. Останній за рахунок швидкого нагрівання піддослідної моделі дозволяє за допомогою портативного *тепловізора* виміряти розподіл *теплого опору* на різних поверхнях моделі. З певним відомим рівнем припущень такий розподіл можна вважати еквівалентним розподілу *тертя лобового опору* при аеродинамічному обдуві моделі. Результати вимірів теплового поля за допомогою тепловізійного знімання автоматично *візуалізують* у вигляді теплової карти.

Застосування термографічної діагностики в концептуальному дизайні транспортних засобів відкриває нові можливості для оптимізації форми та функціональності на ранніх стадіях проектування. Концептуальний дизайн, що включає генерацію ідей, концептуальне опрацювання, ескізування, макетування, тривимірне моделювання та візуалізацію, значно виграє від впровадження термографічних методів дослідження аеродинаміки. На етапі макетування, коли фізична форма концепції вперше матеріалізується, термографічна діагностика дозволяє дизайнерам швидко виявити проблемні зони з сильною лобовою опорою та оптимізувати обтічність форми, не вдаючись до дорогих повномасштабних випробувань. Це важливо при розробці інноваційних транспортних концепцій, де нетрадиційна геометрія потребує аеродинамічного аналізу. Інтеграція термографічної діагностики в процес концептуального дизайну економить час і ресурси, сприяє створенню енергоефективних транспортних засобів, що відповідає функціональним, технічним, технологічним та естетичним вимогам сучасного дизайну. Візуалізація теплових карт є потужним комунікаційним інструментом, який дозволяє дизайнерам обґрунтовувати свої рішення перед замовником, демонструючи науковий підхід до формування транспортних засобів.

Термографічна діагностика аеродинаміки базується на зв'язку між тепловим опором поверхонь моделі та аеродинамічним опором при обтіканні потоку повітря. Коли модель транспортного пошкодження піддається впливу нагрітого повітряного потоку, розподіл температури на її поверхні виявляє особливості взаємодії з цим потоком. Ділянки з підвищеним аеродинамічним опором демонструють характерні теплові профілі, які фіксуються за допомогою тепловізора та трансформуються у видимі теплові карти. Використання портативних тепловізорів у поєднанні з простими генераторами повітряного потоку, наприклад будівельний фен, робить цю методику доступною на ранніх стадіях концептуального дизайну, коли традиційні аеродинамічні труби можуть бути недоступними через обмеження бюджету чи технічні складності. Хоча така методика має певні обмеження в точності відповідно до промислових аеродинамічних випробувань, вона дає достатню інформацію для ітеративного вдосконалення форми транспортного потенціалу на концептуальному етапі. Особливо важливим є застосування термографічної діагностики при розробці електричного транспорту, де аеродинамічна ефективність впливає на ходу та енергоспоживання, що є критичними характеристиками для споживача.

Постановка проблеми. Основні поняття термографії. В термографії оперують базовими поняттями – тепловізор, термограма, тепла карта тощо. Дамо коротку характеристику цих понять і термінів.

Тепловізори (тепловізійні, інфрачервоні камери) – це оптично-електронні прилади для дистанційного контролю та виявлення об’єктів, які випромінюють тепло. Зазвичай вони споряджаються об’єктивом, приймачем *інфрачервоного* випромінювання (матрицею), дисплеєм, органами управління та портами виводу інформації на ПК, незалежними елементами живлення, тощо. Обладнання працює за принципом *термографії*, що надає можливість виявляти і фіксувати джерела теплового випромінювання незалежно від зовнішніх умов. Саме ця якість вигідно відрізняє тепловізори від приладів *нічного бачення*, у яких функціональна можливість безпосередньо залежить від освітленості, наявності опадів тощо. На сьогодні тепловізори є найбільш досконалим засобом контролю та реєстрації температурних та *теплових полів*. Сучасні навіть недорогі тепловізори стали невід’ємним атрибутом навігації літальних апаратів, систем наведення, в роботі будівельників, для мисливців, медиків, науковців, прикордонників, спостерігачів військової розвідки, служб спеціального призначення тощо. В нашій країні доступний модельний ряд тепловізорів [1].

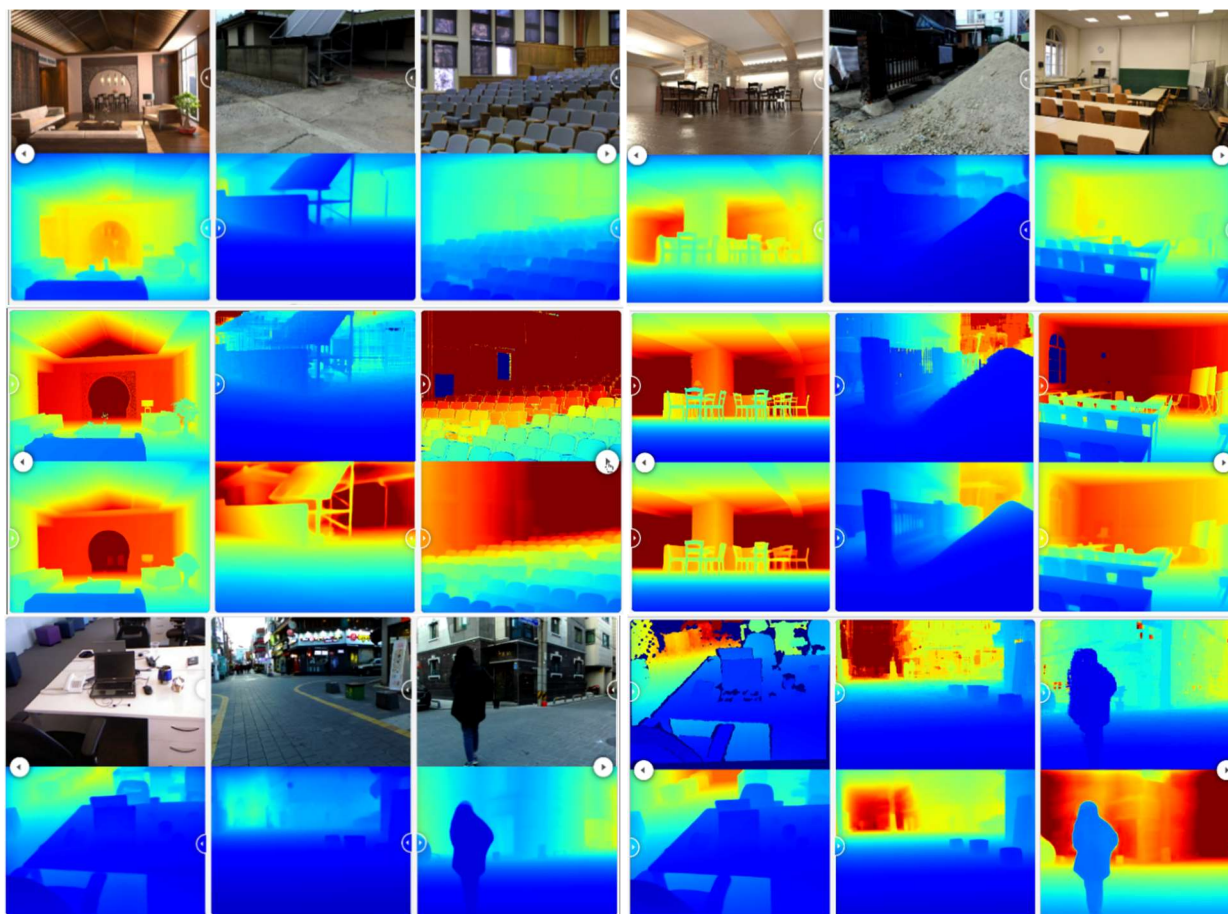


Рисунок 1 – Теплові поля зовні і всередині приміщень: різниця у роздільній здатності термограми за різних налаштувань температурного діапазону тепловізора.

Figure 1 – Thermal fields outdoor and indoor: difference in thermogram resolution at different temperature range settings of the thermal imager.

Тепловізійне обстеження – це знімання споруд або окремих конструкцій тепловізором в *інфрачервоному* діапазоні. В результаті знімання генерується термограма об’єкта, де показана миттєва

середня температура в різних точках його конструкції (це знімок об'єкта в інфрачервоному спектрі випромінювання, накладений на *контури* об'єкта). Нерівномірність її *розподілу* вказує на наявність дефектів, які або вже стали або скоро стануть причиною проблем, або ж тих місць, які потребують удосконалення. Отримана *термограма* показує градацію *спектральних кольорів*, що складаються з температурних полів, які відповідають реальному градусному діапазону об'єкта [2].

Теплова карта (англ. *heatmap*) – графічне представлення даних, при якому окремі значення що містяться в матриці, представлено у вигляді кольорів. Такий спосіб представлення даних придумали давно і, мабуть, наочний його приклад – це *карта температур* під час прогнозу погоди. Крайні значення відповідають синьому і червоному кольорам, а комфортні значення відповідають зеленому кольору. Аналіз теплових карт іноді призводить до інсайтів або виявлення *аномалій*, які непомітні під час аналізу інших форматів даних.

Теплові карти – ефективний і наочний спосіб візуалізації даних у випадках, коли потрібно показати *ступінь зміни* параметра у заданому просторі *якісно* – за допомогою кольору. Тобто, конкретні числові значення перетворюються на кольори. І ці числові значення прив'язані до будь-якої точки чи зони. Інженери використовують *теплові карти* при аналізі деталей у 3D на міцність, візуалізують результати моделювання інших навантажень і процесів.

Також теплові карти використовують в обробці зображень з великим *динамічним діапазоном* для оцінки стартової метричної глибини кадра. Ця проблема є складною, якщо невідомі параметри камери, бо тоді важко оцінити різницю в RGB і глибини кадрів через неоднозначність шкали глибини. Модель дифузії використовує для оцінки *глибини кадру* його теплову карту та кілька інновацій – логарифмічна параметризація глибини, обмеження поля зору (для обробки неоднозначності масштабу) і синтетичне *доповнення поля зору* під час навчання (для узагальнень поза обмеженнями камери в навчальних даних). Метод знижує на 25% похибки у кадрах у приміщенні та 33% у кадрах на вулиці, за малу кількість кроків усунення шумів [3]. Результати поліпшення таких теплових карт ви можете бачити на наступних знімках (рис. 1).

Аналіз публікацій і досліджень. У зовсім іншому масштабі теплові карти формують за даними *спектральних* супутникових знімків для аналізу *зон тепла* всередині міст. Так, за висновками дослідження [4], в межах острова тепла над містом Київ розподіл температури залежить від ландшафтно-функціональної структури міста – від ступеня нагрівання і випромінювання земних покривів, їх співвідношення та змін у часі. За тепловими картами, отриманими при обробці знімків супутника **Landsat** вчені виявили, як і де відбуваються зміни температури поверхні землі в нашій столиці.

Аналізуючи розподіл температур у часі за понад 30 років уздовж профілів, які перетинають промислові території Києва, вони виявили, що ці зони мають підвищений рівень тепла на поверхні землі і завдячують цим збільшенням площі *асфальтованих* поверхонь. Високі прирости температур зафіксовані на околицях міста в місцях нового житлового будівництва і знищення природних ландшафтів, і це розширило межі теплового острова Києва. Аналіз наземної температури за сезонами показав, що *теплові аномалії* над виробничими зонами є постійними, але влітку їх амплітуда коливається між виробничими і лісопарковими зонами на 15°C.

Інші приклади використання тепловізійного знімання стосуються вирішення задач енергозбереження, технічного моніторингу, неруйнівного контролю матеріалів і устаткування, медичної термографії, екологічного моніторингу, криміналістики, митного контролю, сільського господарства, наукових досліджень тощо. В нашій країні на науковому рівні цим займається фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України. Деталі перелічених вище напрямків застосування результатів аналізу теплових полів можна побачити на його сайті [5].

В реальному дизайн-процесі термографічна діагностика виконується циклічно. Спочатку створюється первинна модель на основі концептуальних ескізів, яка піддається діагностиці. Отримані результати аналізуються, після чого в конструкцію вносяться зміни, і повторюються. Така ітеративна методика дозволяє збільшити оптимізацію аеродинамічних характеристик, наближаючи їх до бажаних параметрів. Для концептуального дизайну транспортних засобів особливо важливі зони переходу між

функціональними елементами конструкції, де часто виникають турбулентні потоки. Індивідуальна термографічна діагностика дозволяє виявити такі проблемні зони і скоригувати форму для забезпечення плавних переходів та зниження опору.

Чисельний аналіз теплових полів. Останні 20 років, завдяки розвитку комп'ютерних технологій, чисельний аналіз розподілу теплових неоднорідностей здійснюють за допомогою комп'ютерного моделювання у *спеціалізованих* математичних та інженерних прикладних системах. У цих системах реалізовані різні алгоритми обчислень розподілу теплового поля, що базуються на математичних моделях різного ступеня точності.

Математичну модель теплових полів описує *рівняння теплопровідності* з крайовими умовами. Це *нелінійне* диференціальне рівняння у частинних похідних 2-го порядку, яке залежить від теплопровідності, теплової дифузії, густини матеріалу, питомої теплоємності, інтенсивності джерела тепла і часу теплової взаємодії. Його частинні випадки для різної форми *джерела тепла*, що діє на однорідний об'єкт, наприклад, мікросхему, наведено у праці [6]. Складніша математична модель для опису нестационарного теплообміну у складових теплозахисних конструкціях наведена в праці [7]. Дещо популярніше математичний аналіз *теплого обміну* викладений у посібнику [8].

Аналіз теплових полів можна проводити також за допомогою спеціальних програмних середовищ, наприклад, **Elcut**, **SolidWorks** або **Ansys**, які реалізують *скінченно-елементні* алгоритми для обчислення та візуалізації теплових полів. Наприклад, саме таким чином аналізується поле температур у приміщенні при роботі систем кондиціонування при змінних теплових навантаженнях цього приміщення у статті [9]. А як це зробити саме в популярному серед дизайнерів у транспортній галузі програмному середовищі **SolidWork**, розказано тут [10]. Обчислення температурних полів у програмі **Elcut** теж нескладне [11], [12].

Проте існує доступніший програмний засіб для комп'ютерного моделювання теплових полів, **T-Flex Аналіз**. T-Flex Аналіз – це інтегроване в **T-Flex CAD** середовище кінцево-елементних розрахунків, яке дає можливість математично моделювати фізичні явища й вирішувати практичні завдання у практиці проектування. Усі розрахунки ведуться методом кінцевих елементів, а між тривимірною моделлю виробу і її кінцево-елементною моделлю підтримується *асоціативний зв'язок*. Це означає, що параметричні зміни твердотільної моделі автоматично переносяться на сіткову кінцеву елементну модель. Система T-Flex Аналіз дозволяє виконати 4 види аналізу: *статичний, частотний, тепловий* та аналіз *стійкості*.

- Статичний аналіз дозволяє обчислити напружено-деформований стан конструкцій під дією прикладених до них постійних у часі сил, і врахувати напруги, що виникають через температурне розширення / стиснення матеріалу або *деформації* конструкції на величину відомих зміщень. У модулі «Статичний аналіз» можна оцінити *міцність* розробленої конструкції з *допустимих напруг*, визначити *вразливі місця* конструкції і внести необхідні зміни, щоб оптимізувати виріб.

- Частотний аналіз дозволяє розрахувати власні (резонансні) частоти конструкції і відповідних форм коливань і виявити резонансні частоти у робочому частотному діапазоні виробу та підвищити надійність виробу, оптимізуючи конструкцію таким чином, щоб унеможливити виникнення *резонансів*.

- Аналіз стійкості важливий для проектування конструкцій, експлуатація яких передбачає тривалі навантаження різної *інтенсивності*, і дозволяє оцінити запас міцності за «критичним навантаженням». Під дією критичного навантаження в стислих зонах конструкції можуть стрибкоподібно виникнути значні непружні деформації, що часто призводять до її руйнування або серйозного пошкодження.

- Тепловий аналіз забезпечує можливість оцінки температурної поведінки виробу під впливом *джерел тепла* та випромінювання і може використовуватися для розрахунку температурних або теплових полів за обсягом конструкції, і спільно зі статичним аналізом для оцінки *температурних деформацій* у виробі. Тепловий аналіз за допомогою програми T-Flex Аналіз описаний у праці [13].

Існує й безкоштовний аналог для теплових розрахунків. Так, розрахунок температурного поля за програмою **Therm** наведений у праці [14].

Методика досліджень. Отримання даних: В даному експерименті для вимірювання теплового поля (розподілу температур по *нерівній* поверхні моделі) використали портативний тепловізор **Flir One Pro** для смартфона на базі ОС Android. Завдяки покращеному 4-кратному тепловому розширенню і обробці зображень VividIR™, Flir One Pro дає можливість бачити більше деталей, більш безпечно працювати з обладнанням під напругою. Функція Flir One Pro **MSX** формує візуальне зображення на дисплеї смартфона, працює у видимому спектрі, рельєфно накладає значення мінімальної та максимальної температури поверх теплового зображення в *інфрачервоному* спектрі. Таким чином, одержувана картина більш інформативна, ніж якби зображення у видимому і інфрачервоному спектрах були рознесені. Апарат забезпечує температурний діапазон від -20° до 120°C . Роз'єм **OneFit** дозволяє підключати Flir One Pro до телефону або планшета через USB-C. Пристрій стійкий до падіння з висоти 1.8 м.

Мобільний додаток Flir One має додаткову функцію експонетра, яка фіксує на зображенні теплового поля *середню* температуру в *контрастних* ділянках простору. Точність *експонетра* залежить від багатьох чинників, у тому числі від відстані до моделі, температури довкілля і випромінювальної здатності матеріалу моделі.

Методика експерименту. Здійснено дослідження *інтенсивності* теплообміну та аеродинамічного опору на поверхні кількох моделей транспорту, а саме: 1 модель автобуса в масштабі 1:50 і 2 моделі дронів літакового типу в масштабі 1:10 і 1:5 відповідно. Масштабні моделі виготовлені з пінополістиролу та обліплені скульптурним пластиліном з наданням їм необхідної форми. Ці моделі розташовувались на горизонтальній твердій поверхні (столі) на вузькій пінопластовій підставці, яка відділяла їх від поверхні стола. Інформаційно-вимірювальний комплекс складався з портативного тепловізора **Flir One Pro** та смартфона **Poco F4**. Експерименти виконані на відкритому повітрі (без проточної аеродинамічної труби). В якості *робочого середовища* використовується повітря лабораторного приміщення.

Перед початком експерименту тепловізор **Flir One Pro** був відкалібрований вручну, щоб вибрати оптимальний динамічний діапазон, який забезпечить найкращу роздільну здатність знімання за даних лабораторних умов. З цією метою ми віднайшли максимально *термально* контрастні об'єкти та відзняли їх кілька разів, щоразу регулюючи чутливість приладу за допомогою відповідної кнопки на його корпусі. Такими об'єктами виявились компоненти системи обігріву приміщення, їхні теплові знімки з нанесеними миттєвими *середніми* температурами наведені на рис. 2.

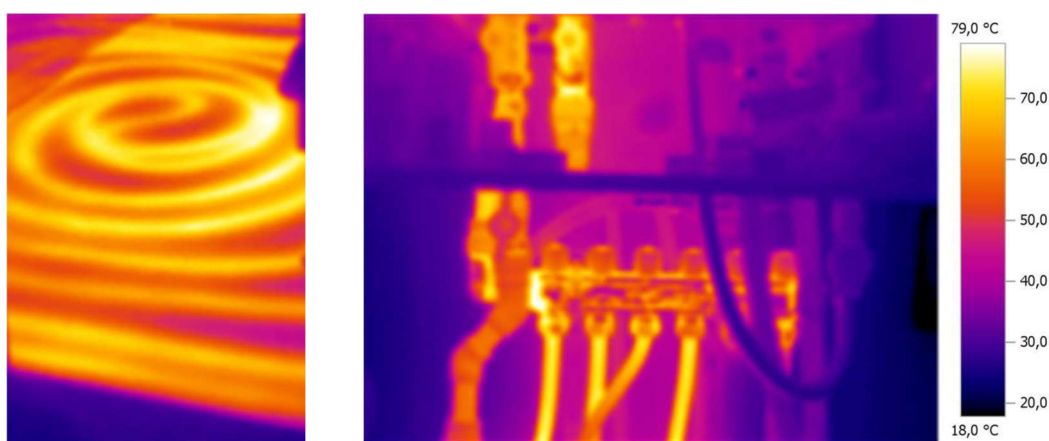


Рисунок 2 – Підсумок калібрування електронно-оптичного тепловізора *Flir One Pro* на термально контрастних об'єктах: діапазон температур понад 10°C відповідає нормальному режиму експлуатації системи обігріву і вказує на оптимальне налаштування приладу.

Figure 2 – Calibration result of the *Flir One Pro* electron-optical thermal imager on thermal contrast objects: the temperature range of more than 10°C corresponds to the normal operating mode of the heating system and indicates the optimal setting of the device.

Спочатку фіксувалась стартова теплова карта для кожної моделі, а потім така модель прогрівалась будівельним феном на протязі 1 хвилини уздовж основних поверхонь лобового опору. Після цього знову вимірювався в додатку Flir One розподіл температури на цих поверхнях. Вимірювання проводилось при кімнатній температурі, $\sim 18^{\circ}\text{C}$. В разі низької контрастності теплового поля (особливо на моделях більшого розміру) об'єкти догрівались, і повторно вимірювалось теплове поле. В результаті вимірювань сформовано альбом теплових зображень, які потім піддавались якісному аналізу по типу "вища температура поверхні моделі еквівалентна її вищому аеродинамічному опору".

Підставою для такого підходу є істотний вплив *геометричних* параметрів трубчастих поверхонь на їхні теплові характеристики та аеродинамічний опір, вивчений у праці Кондратюка В.А. про теплообмін і аеродинаміку пучків плоскоовальних труб в поперечному потоці [15].

Результати досліджень та їх обговорення

Результати аналізу: Теплові зображення, отримані за допомогою тепловізора, як правило, аналізують за допомогою кількісних або якісних методів. Кількісний аналіз вимагає, щоб при вимірюванні була визначена *істинна* температура об'єкта дослідження. Але істинна температура може бути отримана лише за умови встановлення вірного значення коефіцієнта *випромінення* поверхні об'єкта і врахування відбиття й пропускання інфрачервоного випромінення. Ці фактори є суттєвою перешкодою для точного визначення температури навіть при вірно визначеному коефіцієнті випромінення через те, що на практиці їх дуже важко оцінити кількісно. Кількісний аналіз є складним завданням і частіше застосовується у промисловості для точного вимірювання температури *виробничих процесів*.

Якісний аналіз, на відміну від кількісного, не вимагає будь-яких абсолютних вимірювань температури. Замість точних значень в центрі уваги знаходяться розподіл і *відносні зміни* температури. Цей тип аналізу є найбільш поширеним при обстеженні будівель, коли основною метою є виявлення витоків повітря, *дефектів* ізоляції або інших будівельних недоліків, які викликають відхилення температури від деякого базового рівня. Так саме і при обстеженні промислових об'єктів, для виявлення дефектів часто достатньо порівняння теплових картин двох *схожих* елементів, що працюють в однакових умовах. Точно визначити коефіцієнти випромінення і температуру об'єктів для цього нема потреби. Приклади *якісного аналізу* наводяться у навчальному посібнику "Основи термографії" [16].

Конкретні результати вимірювань наведено на рис. 3-6. Наведемо *якісний* аналіз для кожної моделі.

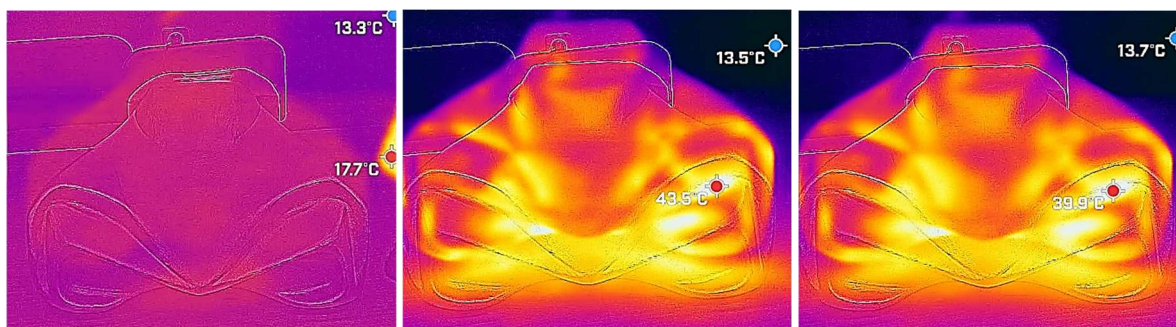


Рисунок 3 – Теплове поле моделі спорткара: зліва – початковий стан, решта – після завершення термодинамічного випробування.

Figure 3 – Thermal field of a sports car model: on the left – initial state, the rest – after completion of the thermodynamic test.

Зокрема, на рис. 3 очевидно, що області з найбільшою *інтенсивністю* світіння (*проксі* канал температурного нагріву) припадають на обтічники бампера та лонжерони спорткара зі складною

метеликоподібною формою. За відсутності наскрізного проходу повітря вони чинять аномально високий лобовий опір, особливо в заглиблених гніздах фар. Саме на це вказує максимальний градієнт температур в області бампера. Інша область підвищеного опору повітря припадає на вузьку передню частину кабіни, яка вивиснується над хвилястою поверхнею капота як кокпіт давнього літака-винищувача. Очевидно, надмірне захоплення автора моделі аеродинамічними формами кінця 1950-х років, які давно себе вичерпали з точки зору ефективності, на призвело до успіху, але очевидно це стало лише після експерименту.



Рисунок 4 – Теплове поле моделі автобуса: різні етапи термодинамічного випробування.
Figure 4 – Thermal field of a bus model: different stages of thermodynamic testing.

На рис. 4 максимальний градієнт лобового опору, на який вказує яскрава пляма, припадає на завищену лобову частину кабіни автобуса, у якій автор намагався розмістити додатковий багаж, або джерела енергії. З точки зору оптимальної аеродинаміки така форма кабіни є невдалою, як і випуклі назовні бічні поверхні уздовж нижньої частини корпусу. Зрештою, термограма навіть фіксує опір утоплених вглиб салону округлих вікон, що нагадують ілюмінатори літака. Тут так само захоплення формами, властивими кінцю 1960-х років, не є виграншою стратегією для моделі. Отже, дизайн є ефектним, але не ефективним (візуалізація ліній току, наприклад, у SolidWorks, дозволить унаочнити це переконливіше).

На рис. 5 представлена теплова карта для моделі малого турбогвинтового дрона з хвостовим розміщенням гвинта у захисній круговій гондолі. Розподіл температур, за припущенням еквівалентний розподілу лобового опору, показує максимуми у трьох областях: тупоносій обтічник носової частини корпусу; овальний виступ спереду, що нагадує кабіну лайнера; круговий кожух захисної гондoli двигуна. Очевидні рекомендації полягають у загостренні носової частини, згладженні верхньої частини корпусу та зміні форми заднього обтічника двигуна. Його нижню частину доцільно взагалі прибрати, а у верхній змінити кут і положення фіксаторів.

Рис. 6 демонструє теплову карту для планера дрона далекого радіуса дії, розробка яких є актуальною в умовах активної протидії російській агресії. В даному випадку розподіл світлових областей також вказує на проблеми з аеродинамікою носової частини та потребу в її вдосконаленні. Також проглядаються області підвищеного опору у точках примикання передньої частини крила до корпусу, що вказує на потребу її звуження до середини корпусу. А решта форми корпусу є “холодною” і показує прийнятну аеродинаміку.

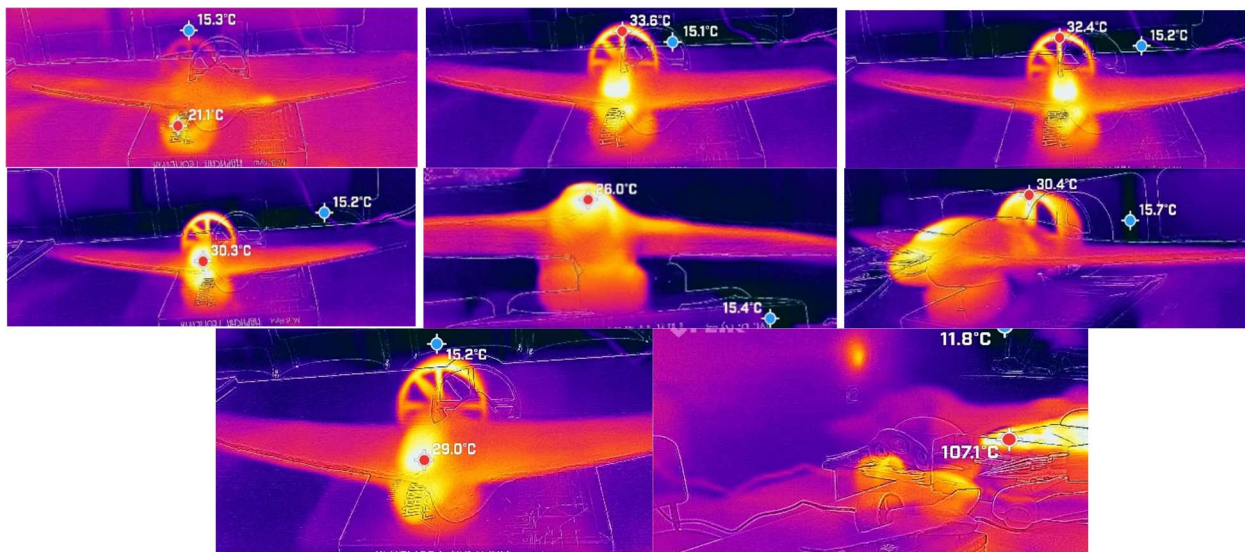


Рисунок 5 – Теплове поле моделі турбогвинтового дрона: різні етапи термодинамічного випробування.

Figure 5 – Thermal field of a turbopropeller drone model: different stages of thermodynamic testing.

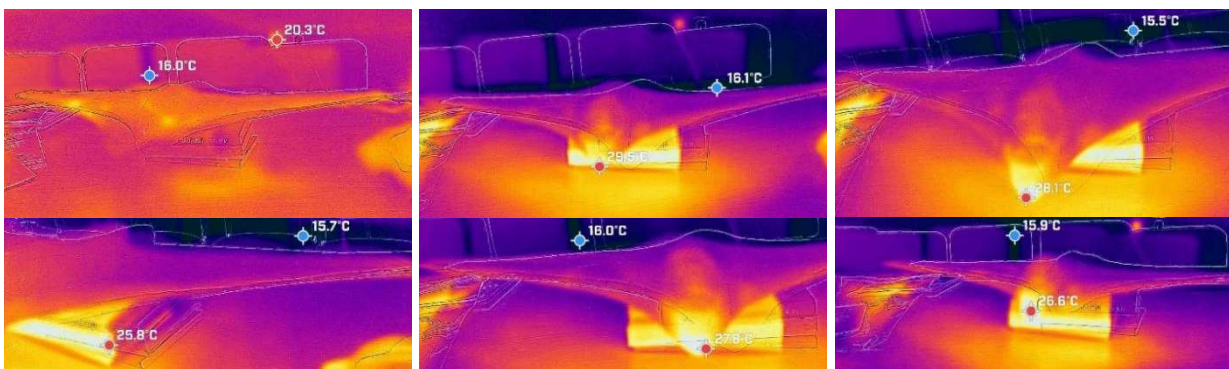


Рисунок 6 – Теплове поле моделі планера дрона далекої дії: різні етапи термодинамічного випробування.

Figure 6 – Thermal field of a long-range drone airframe model: different stages of thermodynamic testing.

Обговорення результатів: Чисельний аналіз теплового розподілу по поверхні моделі як результат газодинаміки потоку нагрітого повітря уздовж її поверхні, зручно робити в програмному комплексі **SolidWorks Flow Simulation**. За попередніми результатами аналізу можна зробити висновок про ефективність форми за продувкою з фронтальної сторони на основі отриманих параметрів розподілу температури і теплового потоку. Проаналізовані причини зниження теплового розсіювання виробів, і виявлені місця для удосконалення конструкції з точки зору ергономіки та аеродинаміки.

Грунтуючись на аналогії принципів роботи аеродинамічної труби і будівельного фену, за стартову точку дослідження обрана задача оптимізації передньої частини моделей, яка підлягає найбільшому лобовому опору. Визначальними критеріями для такої оптимізації є різниця теплопередачі фронтальної та бічних поверхонь кожного з досліджуваних виробів, що яскраво проявляється у неоднорідній картині градієнта теплового поля.

При оптимізації форми виробу за критерієм тепловіддачі до повітря встановлено, що при малих значеннях кута розвороту моделі, коефіцієнт тепловіддачі до повітря має тенденцію до збільшення. Точка екстремуму функції, для всього діапазону швидкостей потоку, доводиться на кут розвороту моделі 15°. Подальше зниження інтенсивності теплообміну пояснюється впливом зони втраченого

теплообміну. Після *оптимізації* моделі отримано позитивний ефект тепловіддачі нової форми на ~10% порівняно з початковою формою. При оптимізації розмірів моделі за критерієм *динамічного опору* руху повітря встановлено, що зі збільшенням кута нахилу *фронтальної* поверхні моделі автобуса (зменшенням площі поверхні опору повітря) *градієнт* температури (а отже й лобовий опір) спадає.

При оптимізації фронтальної поверхні моделі автобуса за критерієм *аеродинамічного опору* повітря доцільно спроектувати кілька варіантів такої поверхні з різним кутом атаки повітря і площею фронтальної поверхні. Це дасть змогу обрати кращий варіант за результатами *статистичного аналізу* варіантів. При проектуванні конструкції виробу доцільно виходити з властивостей *уніфікації* його основних вузлів і фрагментів. В даному випадку, особливу роль відіграють геометричні параметри фронтальної частини, а саме її висота і ширина. Конкретні числові значення відповідних параметрів виходять за рамки даного експерименту.

Висновки: Проведено літературний огляд методів вимірювання та аналізу теплових полів. Описані методи моделювання теплових полів, інструменти для їх вимірювань тощо. Охарактеризовано методику теплового обдуву моделей транспорту з метою імітації теплового навантаження як альтернативного проксі-аналога аеродинамічного тиску для визначення лобового опору моделі потоку повітря, що набігає.

Розроблена спрощена методика вимірювання та аналізу теплових полів на поверхні зменшених у певному масштабі моделей автобуса та дронів різної форми, які є предметом дослідження в *кваліфікаційній роботі* магістрів дизайну.

Результати вимірювання та якісного аналізу теплових полів розрізняються для моделей достатнім чином, щоб виокремити області *підвищеного опору*, які потребують уточнення форми згідно оптимальних аеродинамічних та ергономічних характеристик кожної моделі. У тепловому полі чітко проявляються *контури* фронтальних та торцевих стінок моделі згідно перепадів температури після обдуву гарячим повітрям на протязі 1 хвилини. Результати експериментального вимірювання температури моделей розрізняються для максимальної температури активного елемента і для виступів та накладок в діапазоні до 12% від *теплового фону*.

Загальна картина розподілу температури на поверхні виробів дозволяє зробити попередні висновки про необхідні зміни у форму передньої частини корпусу кожної моделі, необхідні для того, щоб зменшити її лобовий опір та покращити аеродинаміку, виходячи із площі перегріву найбільш нагрітої частини поверхні виробів. Також це означає, що, загалом, компактний тепловізор **Flir One Pro** цілком придатний для простих експериментів з *якісного аналізу* теплового поля твердотільних моделей транспортних засобів після їх обдуву гарячим повітрям. Отже, отриманої теплової картини *розподілу температур* достатньо для якісного (*порівняльного*) аналізу аеродинамічних характеристик таких моделей в умовах навчальної лабораторії.

Ефективність використання *дизайнерських* засобів зменшення температури *розігріву* моделі шляхом зміни її форми може бути оцінена лише після проведення *повторного* тепловізійного знімання та аналізу його теплового поля. Можливо, таких ітераційних етапів з удосконалення форми виробів знадобиться кілька, принаймні, не менше 3 спроб. Лише тоді можна буде порівняти зміни у відсотковому відношенні.

Термографічна діагностика аеродинаміки моделей транспорту при їх концептуальному дизайні є потужним інструментом, що дозволяє оптимізувати аеродинамічні характеристики на ранніх стадіях проектування. Ця методика забезпечує швидкий зворотний зв'язок для дизайнерів, дозволяючи ітеративно вдосконалювати концепцію без потреби в дорогих повномасштабних випробуваннях. Інтеграція термографічної діагностики в процес концептуального дизайну забезпечує створення більш ефективних, екологічних та інноваційних транспортних засобів, що відповідають вимогам сучасного суспільства. У майбутньому, з розвитком технологій термографії та методів аналізу даних, ця методика має потенціал стати більш точною та інформативною, відкриваючи нові можливості для транспортного дизайну.

В рамках розвитку принципів відкритої науки основний зміст даної публікації, що відображає суть результатів звіту про індивідуальне науково-дослідне завдання для комплексного проектування автотранспорту для магістрів першого року навчання, перебуває у відкритому доступі [17].

Перелік посилань

1. Тепловізори DALI: висока якість і доступність для споживача. *Маркет вимірювальних приладів "Simvolt"*. Блог. Київ, 2020.. URL: <https://simvolt.ua/teplovizori-dali-visoka-yakist-i-dostupnist-dlya-spozhivacha/>.
2. Обстеження будівлі тепловізором. *ТЗОВ МСП "Промматеріал"*. Львів, 2023. URL: <http://prommaterial.com.ua/obstezhennia-budivli-teplovizorom.html>.
3. Saurabh Saxena, Junhwa Hur, Charles Herrmann, Deqing Sun, David J. Fleet. Zero-Shot Metric Depth with a Field-of-View Conditioned Diffusion Model. *Computer Science*. 2023. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.13252>. URL: <https://diffusion-vision.github.io/dmd/>.
4. Ліщенко Л.П. Моніторинг теплового поля поверхні колишніх виробничих зон і промислових об'єктів м. Київ за супутниковими даними. *Укр. журнал дистанційного зондування Землі*. 2020. №25. С. 17–27. DOI: 10.36023/ujrs.2020.25.172. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/download/172/191>
5. Аналізатори теплових полів. *ФТІНТ ім Б.І. Веркіна НАН України*. Харків, 2023. URL: https://ilt.kharkiv.ua/bvi/technology/atp/atp_u.htm
6. Кудикіна Т.О., Гончаренко В.О., Кузьменко І.В. Дослідження теплових полів у мікросхемах. *Актуальні проблеми навчання та виховання людей з особливими потребами: Зб. наук. праць*. С. 374-382. URL: <https://ap.uu.edu.ua/article/594>
7. Веселовський В., Берлов О. Розрахунок температурних полів складених конструкцій. *Вісник Тернопільського держ. техн. ун-ту*. 2008. Т. 13, № 1. С. 161-170. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/186563362.pdf>
8. Ванєєв С.М. Комп'ютерне моделювання динамічних систем. Практикум. Тепловий аналіз ущільнень. Суми: СумДУ, 2019. URL: https://elearning.sumdu.edu.ua/free_content/lectured:5ad1fb886b43a18f3b33894d16dcd2798afb3ed2/latest/859110/КМДС_л_6_.pdf
9. Москвітїна А., Шишина М. Дослідження поля температур у приміщенні при роботі систем кондиціонування при змінних теплових навантаженнях приміщення. *Молодий вчений*. 2020. № 3(79). С. 186-192. DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-3-79-40>. URL: <https://molodyvchenyi.ua/index.php/journal/article/view/1464>.
10. Виконання міцнісного розрахунку на основі даних попереднього теплового аналізу в Ansys Workbench Mechanical. Блог. *Софт Інжиніринг Груп.*, Київ, 2016. URL: <https://www.ansys.soften.com.ua/about-ansys/blog/154-vypolnenie-prochnostnogo-rascheta-na-osnove-dannykh-predvaritelnogo-teplovogo-analiza-v-ansys-workbench-mechanical.html>.
11. Розрахунок температурних полів у програмі Elcut. *Портал Хайтек*. М., 2023. URL: https://haitek.ru/products/raschet_temperaturnogo_polya.php
12. Дубицький С.Д. Elcut – скінченно-елементний аналіз електромагнітних і температурних полів. *IsiCAD – ваше вікно у світ САПР*. *Інж. портал*. М., 2023. URL: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=22698
13. T-Flex Аналіз. Керівництво користувача: Тепловий аналіз. М: Топ-Системи, 2009. С. 39-40. URL: <https://studfile.net/preview/5048969/page:39/>
14. . Сергійчук О.В. Будівельна фізика. Будівельна теплотехніка огороджувальних конструкцій будівель. *Лабор. практикум*. Розрахунок опору теплопередачі за програмою Therm. Київ: КНУБА, 2020. 40 с. URL: https://org2.knuba.edu.ua/pluginfile.php/106684/mod_folder/content/0/Лабораторна%20робота.Розрахунок%20за%20програмою%20THERM.ppsx
15. Кондратюк В.А. Теплообмін і аеродинаміка пучків плоскоовальних труб в поперечному потоці. Дис. ... к.т.н. Київ: НТУУ КПІ, 2016. 1977 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/15801/1/Kondratyuk_dis.pdf
16. Махотіло К.В., Лисенко Л.І., Булгаков О.В. Основи термографії: навч. посіб. Харків: ФОП Панов А.М., 2021. 106 с. ISBN 978-617-7947-76-8. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/e7345a4e-e63f-451e-809f-ba951c84a96e/content>
17. Дубовенко Ю.І., Кузьмінець М.П., Розовенко А.І., Старусьова М.Ю. Якісний аналіз аеродинаміки твердотільних моделей транспорту за допомогою тепловізора. *Звіт про ІНДЗ*. НТУ, 2023. URL: <https://telegra.ph/Aerodynamics-analysis-of-solid-body-models-through-thermal-imaging-12-30>

THERMOGRAPHIC DIAGNOSTICS OF AERODYNAMICS OF TRANSPORT MODELS DURING THEIR CONCEPTUAL DESIGN

Kuzminets Nikolai P., Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, National Transport University, Chairman at Dept. of computer, engineering drawing and design, e-mail: kuzminecmp@ukr.net, phone +380442849713, Ukraine, 01103, Kyiv, M. Boychuk street 42, office 705. <https://orcid.org/0000-0002-9636-919X>.

Dubovenko Yurii I., Doctor of Philosophy in Physics and Maths, Associate Professor, National Transport University, senior teacher at Dept. of computer, engineering drawing and design, e-mail: nemishayeve@ukr.net, phone +380665979384, Ukraine, 01103, Kyiv, M. Boychuk street 42, office 709. <http://orcid.org/0000-0002-8128-5989>

Abstract. The results of a study on the aerodynamics of solid-state transport models using thermographic diagnostics are presented. The feasibility of employing the portable thermal imager Flir One Pro combined with a smartphone is substantiated as an affordable and mobile tool for analyzing thermal fields that emerge during hot-air flow around scaled models. The methodology involves surface heating with a construction hairdryer followed by visualization of temperature distribution as thermal maps, which with certain assumptions reflect zones of increased aerodynamic drag. The objects of study included scaled models of a bus and unmanned aerial vehicles, manufactured from polystyrene and plasticine. Qualitative analysis of thermal images allowed the identification of critical frontal resistance areas linked to geometric shaping features, particularly in the nose section, wing–fuselage junctions, and protruding structural elements. Several optimization recommendations are outlined, including nose reshaping, cabin volume reduction, body contour smoothing, and modifications of engine nacelles. The findings demonstrate that even under field conditions, designers can obtain rapid visual “feedback” regarding the efficiency of conceptual solutions without wind tunnel testing. The technique is suitable for iterative improvement of transport forms in the early stages of design, when resource efficiency and development speed are crucial. The integration of thermography with computer-aided modeling suits (e.g., SolidWorks, T-Flex, Elcut) is highlighted for developing more energy-efficient and ergonomic transport concepts. The study fills a gap in literature, where systematic descriptions of thermographic methods in conceptual transport design have been lacking, and defines directions for integrating thermal imaging into industrial design practice.

Keywords: Simulation, thermography, thermal imaging, aerodynamic drag, portable thermal imager, conceptual design, UAV, bus model.

References

1. DALI thermal imagers: high quality and affordability for the consumer. *Market of measuring devices “Simvolt”*. Blog. Kyiv, 2020. URL: <https://simvolt.ua/teplovizori-dali-visoka-ya-kist-i-dostupnist-dlya-spozhivacha/> [in Ukrainian].
2. Inspection of a building with a thermal imager. *LLC MSP “Prommaterial”*. Lviv, 2023. URL: <http://prommaterial.com.ua/obstezhennia-budivli-teplovizorom.html> [in Ukrainian].
3. Saurabh Saxena, Junhwa Hur, Charles Herrmann, Deqing Sun, David J. Fleet. Zero-Shot Metric Depth with a Field-of-View Conditioned Diffusion Model. *Computer Science*. 2023. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.13252>. URL: <https://diffusion-vision.github.io/dmd/>
4. Lishchenko L.P. Monitoring the thermal field of the surface of former production zones and industrial facilities in Kyiv using satellite data. *Ukrainian Journal of Remote Sensing of the Earth*. 2020. No. 25. P. 17–27. DOI: 10.36023/ujrs.2020.25.172. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/download/172/191> [in Ukrainian].
5. Thermal field analyzers. *B.I. Verkin Institute of Thermal Informatics and Thermal Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine*. Website post. Kharkiv, 2023. URL: https://ilt.kharkiv.ua/bvi/technology/atp/atp_u.htm [in Ukrainian].
6. Kudykina T.O., Goncharenko V.O., Kuzmenko I.V. Investigation of thermal fields in microcircuits. Current problems of education and upbringing of people with special needs: Collection of scientific issues. P. 374-382. URL: <https://ap.uu.edu.ua/article/594> [in Ukrainian].
7. Veselovsky V., Berlov O. Calculation of temperature fields of composite constructions. *Bulletin of*

Ternopil State Technical University. 2008. Vol. 13, No. 1. P. 161-170. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/186563362.pdf> [in Ukrainian].

8. Vanieyev S.M. Computer modeling of dynamic systems. *Workshop*. Thermal analysis of seals. Sumy: SumDU, 2019. URL: https://elearning.sumdu.edu.ua/free_content/lec-tured:5ad1-fb886b43a18f3b33894d16dcd2798afb3ed2/latest/859110/KMДС_л_6_.pdf [in Ukrainian].

9. Moskvitina A., Shishina M. Research of the temperature field within indoor area during the operation of air conditioning systems with variable thermal loads of the room. *Young Scientist*. 2020. No. 3(79). P. 186-192. DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-3-79-40>. URL: <https://molodyvchenyi.ua/index.php/journal/article/view/1464> [in Ukrainian].

10. Performing strength calculations based on preliminary thermal analysis data in Ansys Workbench Mechanical. Blog. *Soft Engineering Group.*, Kyiv, 2016. URL: <https://www.ansys.soften.com.ua/about-ansys/blog/154-vypolnenie-prochnostnogo-rascheta-na-osnove-dannykh-predvaritelnogo-teplovogo-analiza-v-ansys-workbench-mechanical.html>

11. Calculation of temperature fields in the Elcut program. *Portal Haitek*. M., 2023. URL: https://haitek.ru/products/raschet_temperaturnogo_polya.php

12. Dubitsky S.D. Elcut - finite element analysis of electromagnetic and temperature fields. IsiCAD - your window into the world of CAD. *Eng. portal*. M., 2023. URL: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=22698

13. T-Flex Analysis. User's Guide: Thermal Analysis. M: Top-Systems, 2009. P. 39-40. URL: <https://studfile.net/preview/5048969/page:39/>

14. Sergeichuk O.V. Building Physics. Building Thermal Engineering of Building Enclosing Structures. *Lab. Practical*. Calculation of Heat Transfer Resistance Using the Therm Software. Kyiv: KNUBA, 2020. 40 p. URL: https://org2.knuba.edu.ua/pluginfile.php/106684/mod_folder/content/0/Laboratory%20work.Calculation%20with%20therm%20program.ppsx [in Ukrainian].

15. Kondratyuk V.A. Heat transfer and aerodynamics of bundles of flat oval tubes in transverse flow. Dissertation ... Ph.D. Kyiv: NTUU KPI, 2016. 1977 p. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/-123456789/15801/1/Kondratyuk_dis.pdf [in Ukrainian].

16. Makhotilo K.V., Lysenko L.I., Bulgakov O.V. Fundamentals of thermography: a textbook. Kharkiv: FOP Panov A.M., 2021. 106 p. ISBN 978-617-7947-76-8. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/e7345a4e-e63f-451e-809f-ba951c84a96e/content> [in Ukrainian].

17. Dubovenko Y.I., Kuzminets M.P., Rozovenko A.I., Starusova M.Yu. Qualitative analysis of aerodynamics of solid-body models of transport using a thermal imager: Report on Pers. Res. Assign. Kyiv: NTU, 2023. URL: <https://telegra.ph/Aerodynamics-analysis-of-solid-body-models-through-thermal-imaging-12-30> [in Ukrainian].