

УДК 004.925.8:519.876.5:699.83

doi:10.20998/2413-4295.2022.02.09

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ В РАЙОНІ УКРАЇНСЬКОЇ АНТАРКТИЧНОЇ СТАНЦІЇ

С. О. ЦИБУЛЬНИК^{1*}, В. В. НАКОРИК², С. С. РУПІЧ², Д. О. ПІВТОРАК¹

¹кафедра приладів і систем орієнтації і навігації, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, УКРАЇНА

²кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, УКРАЇНА

*e-mail: tsybulnik.s.a@gmail.com

АНОТАЦІЯ Місце розташування української антарктичної станції Академік Вернадський призводить до виникнення низки проблем, пов'язаних з необхідністю забезпечення життєдіяльності та безпеки людей. Інфраструктура станції Академік Вернадський протягом року зазнає впливу значних кліматичних навантажень, таких як: вітер, дощ, сніг та низька температура. Руйнування або навіть значне пошкодження елементів інфраструктури антарктичної станції може викликати загрозу для життя людей, які знаходяться на ній та не мають можливості евакуюватися. Тому необхідно визначити поля розподілу вітрового навантаження в межах антарктичної станції Академік Вернадський для виявлення найбільш навантажених об'єктів її інфраструктури. Програмне середовище системи автоматизованого проектування SolidWorks дозволяє будувати геометричні моделі об'єктів різної складності. Саме тому дану систему було обрано для моделювання інфраструктури української антарктичної станції Академік Вернадський. Імітаційне моделювання впливу вітрового навантаження проведено у програмному комплексі скінчено-елементного аналізу ANSYS. Створено геометричні моделі об'єктів інфраструктури станції. Використовуючи фотографії української антарктичної станції Академік Вернадський та її топологічну карту, також створено геометричні моделі місцевості та складальні одиниці місцевості з установленими на ній об'єктами інфраструктури станції. У результаті імітаційного моделювання з використанням розроблених геометричних моделей отримано поля тиску та векторні поля швидкості повітряного потоку, які показують кількісні та якісні результати. Створено геометричні моделі та виконано імітаційне моделювання об'єктів інфраструктури української антарктичної станції Академік Вернадський в умовах вітрового навантаження. Показано, що у випадку дії вітру з материка елементами інфраструктури станції, які сприймають основне вітрове навантаження, є головною будівля та РВС-200. Визначено, що наявність пального фундаменту впливає на векторні поля швидкості, тож даним елементом не бажано нехтувати при виконанні подальших досліджень. Показано, що практично всі об'єкти інфраструктури станції призводять до виникнення значних турбулентних хвостів при їх обтіканні.

Ключові слова: імітаційне моделювання; геометричне моделювання; Академік Вернадський; CAE; ANSYS

AIRFLOW SIMULATION AT THE UKRAINIAN ANTARCTIC STATION

S. TSYBULNYK¹, V. NAKORYK², S. RUPICH², D. PIVTORAK¹

¹Department of Orientation and Navigation Instruments and System, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, UKRAINE

²Department of Computer-Integrated Optical and Navigation Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The location of the Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station leads to several problems related to the need to ensure the livelihood and safety of people. The infrastructure of Vernadsky station is affected by significant climatic loads during the year, such as wind, rain, snow and low temperatures. The destruction or even significant damage to the infrastructure of the Antarctic station can endanger the lives of people who are on it due to the inability to evacuate. The purpose of the study is to determine the fields of wind load distribution within the Antarctic Vernadsky station. This is necessary in order to identify the infrastructure objects that are most affected by wind loads. SolidWorks computer-aided design software environment allows you to build geometric models of objects of varying complexity. That is why this system was chosen to model the infrastructure of the Ukrainian Antarctic Vernadsky station. Simulation modeling of wind load was performed in the computer-aided engineering software of finite element analysis ANSYS. Geometric models of the infrastructure objects of the Ukrainian Antarctic Vernadsky station were created. Simulation modeling of the station under wind load conditions was performed. It is shown that in the case of wind from the mainland, the elements of the station's infrastructure that receive the main wind load are the main building and the VST-200. It is determined that the presence of a pile foundation affects the velocity vector fields, so this element should not be neglected when performing further research. It is shown that practically all objects of the station's infrastructure lead to significant turbulent vortices. Geometric models of the infrastructure objects of the Ukrainian Antarctic station Academician Vernadsky were created. Simulation modeling of the station under wind load conditions was performed. It is shown that in the case of wind from the mainland, the elements of the station's infrastructure that receive the main wind load are the main building and the RVS-200. It is determined that the presence of a pile foundation affects the velocity vector fields, so this element should

not be neglected when performing further research. It is shown that almost all infrastructure objects of the station lead to significant turbulent tails when they flow around.

Keywords: simulation; geometric modeling; Vernadsky station; CAE; ANSYS

Вступ

Місце розташування української антарктичної станції Академік Вернадський викликає ряд проблем, що можуть виникнути у разі появи надзвичайних ситуацій. Це пов'язано з тим, що більшу частину року води, які оточують станцію, укриті кригою і проведення швидкої евакуації людей або рятувальних операцій є неможливим. Отже, актуальною задачею є забезпечення безаварійної експлуатації інфраструктури антарктичної станції.

Інфраструктура станції Академік Вернадський включає в себе ряд основних та допоміжних будівель, що протягом року сприймають значні кліматичні навантаження від низької температури, сильного вітру, значних опадів у вигляді дощу та снігу. Саме тому питання надійності цих об'єктів є особливо актуальними в умовах Антарктики. Прикладами надзвичайних ситуацій можуть бути інциденти, які виникли на різних антарктичних станціях, таких як:

- європейська станція Конкордія, на якій через неухважність одного зі співробітників у 2012 році стався невеликий побутовий вибух [1], який не спричинив значних наслідків;

- російська станція Прогрес, на якій у 2008 році в результаті пожежі через несправність електричної проводки [2] згоріла одна будівля, загинула одна людина і отримали значні опіки ще двоє;

- бразильська станція Команданте Феррас, яка 25 лютого 2012 року була практично повністю знищена пожежею [3-5], яка виникла в приміщенні з генераторами та забрала життя двох співробітників.

Це далеко не повний перелік ситуацій, які продовжують виникати на території Антарктики [6-9]. У багатьох випадках подібні аварії відбувалися всередині приміщень з генераторними установками, захищеними від більшості серйозних зовнішніх впливів, наприклад, вітрового та снігового навантажень. Однак основні резервуари з нафтопродуктами знаходяться поза приміщеннями і схильні до всього спектра несприятливих зовнішніх впливів. Наприклад, пориви вітру в комбінації з низькою температурою можуть стати причиною виникнення крихких руйнувань металевих конструкцій об'єктів інфраструктури особливо у випадку неправильного вибору марки сталі при проектуванні [10-13]. Наприклад, РВС-200, який експлуатується на українській антарктичній станції має саме таку проблему [14,15]: його конструкція містить елементи з вуглецевої сталі звичайної якості ВСт5пс, що працює в інтервалі температур від 0 °С до +425 °С. Дана сталь стає крихкою при низьких температурах та може зазнати швидкого руйнування при дії сильних поривів вітру.

Інфраструктура станції має забезпечувати її функціонування протягом року. Враховуючи

величезну матеріально-технічну складність будівництва в Антарктиці, важко забезпечити надійну роботу станції та захистити об'єкти інфраструктури від снігових заметів і вітру. Полярні вітри розносять сніг по всьому континенту, а на будь-якому вертикальному об'єкті швидко виростає сніжний замет. Накопичений сніг може призвести до передчасного руйнування будівель.

Архітектура сучасних антарктичних станцій розвивається дуже швидко. Будівлі мають аеродинамічну конструкцію (наприклад, корейська станція Чан Бого) і встановлені на високих палях, тому вітер може вільно розносити сніг під ними. Такі конструкції антарктичних станцій допомагають зменшити навантаження від вітру та снігу на об'єкти інфраструктури. Таким чином, ризик багатоосередкового пошкодження будівель від впливу цих природних навантажень знижується.

На стаціонарних лабораторіях серії Галлея британських антарктичних станцій регулярно виникали проблеми через снігові бурі, а також через активне танення льоду лабораторії поступово сповзали в океан. Тому був розроблений ланцюг мобільних лабораторій на гідравлічних опорах – Halley VI. Це дало можливість підіймати і опускати наукову лабораторію в залежності від кількості снігу, що випав. Модулі станції Halley VI можуть бути ізольовані один від одного, щоб запобігти поширенню можливих пожеж. Також модулі можна від'єднати один від одного і перевезти на нове місце, де в подальшому станція збирається знову в єдине ціле.

Той самий принцип, але в покращеному варіанті, був застосований у проекті німецької антарктичної станції Ноймаєр-3, яка була відкрита в 2009 році. Шістнадцять гідравлічних колон дозволяють усю конструкцію станції підняти. Приблизно раз на рік будівлю піднімають на один метр. Після цього нижній кінець кожної гідравлічної палі також піднімають і знову поміщають в ущільнений сніг.

Нажаль, описані вище проблеми, пов'язані з особливостями розташування української антарктичної станції та матеріалами конструкції об'єктів її інфраструктури, на сьогодні є не вирішеними. Тому проблема визначення зон підвищеного тиску на об'єкти інфраструктури залишається актуальною і потребує вирішення.

Мета роботи

Оскільки найближчим часом не планується оновлення архітектури станції Академік Вернадський, основною метою дослідження є визначення найбільш ймовірних місць скупчення снігу та зон максимального вітрового тиску для виявлення та запобігання багатоосередковому пошкодженню

об'єктів інфраструктури. Дані дослідження раціонально проводити за допомогою геометричного моделювання та чисельних методів розрахунку.

Геометричне моделювання

Для побудови тривимірної моделі станції Академік Вернадський було використано програмний пакет геометричного моделювання SolidWorks, який надає інженерам, дизайнерам і виробникам необхідні для розробки інструменти для проектування, виробництва, моделювання/перевірки, керування файлами, спільної роботи, тощо.

SolidWorks простий у використанні, потужний та перевірений промисловістю програмний засіб, який забезпечує глибину функціональності, необхідну для роботи з найскладнішими конструкціями та найбільшими складальними одиницями. Ці переваги стали ключовими факторами для використання саме цього програмного продукту для створення геометричних моделей об'єктів інфраструктури станції.

План-схему станції Академік Вернадський наведено на рис. 1.

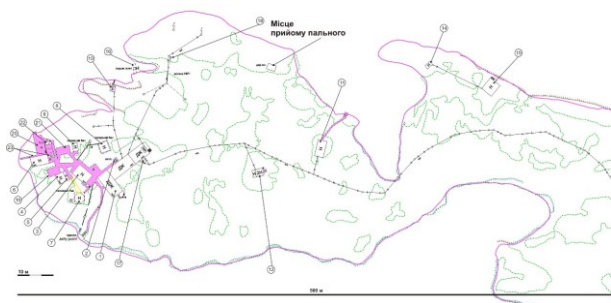


Рис. 1 – План-схема станції та навколишньої території

Дана схема завдяки наявності масштабу дозволила визначити геометричні розміри елементів інфраструктури станції та їх взаємне положення один відносно одного. Додатково для побудови використано фотографію місцевості, яку наведено на рис. 2.



Рис. 2 – Фото з топографією острова Галіндез

Програмна система SolidWorks дозволяє імпортувати рисунки і використовувати їх як основу для побудови ескізів. З рис. 1 та рис. 2 видно, що острів Галіндез має складну форму берегової лінії та кам'янистий ландшафт зі значними перепадами висоти над рівнем моря. Саме тому було вирішено скористатися вищезазначеним функціоналом для імпорту фотографії острова на одну з основних площин відображення у програмному середовищі (рис. 3).

Дана операція дозволяє створити початковий ескіз майбутньої тривимірної моделі у площині, яка паралельна до площини імпортованої фотографії.



Рис. 3 – Ескіз другого контуру місцевості

Програмне середовище SolidWorks дозволяє працювати з об'єктами у масштабі 1:1, тобто є можливість для відтворення острова Галіндез у реальну величину. Проте розміри станції Академік Вернадський (у порівнянні з загальною площею острова) є значно меншими, тож для імітаційного моделювання немає сенсу створювати занадто складну модель. Саме тому геометричну модель острова буде обмежено територією станції Академік Вернадський.

Після визначення границь ескізу за допомогою інструменту «Сплайн» необхідно дуже ретельно відновити контур бажаної області, викривляючи сплайни таким чином, щоб вони якомога точніше повторювали берегову лінію острова. Для майбутнього перетворення у тривимірну модель даний ескіз обов'язково має бути з закритим контуром. Це означає, що через будь-які дві сусідні точки має бути проведено лінію (сплайн), а остання точка має бути з'єднана лінією з першою. При порушенні даного правила створити тривимірну модель неможливо по причині відсутності об'єму у такого елемента (розрахований програмним середовищем SolidWorks об'єм дорівнює нулю).

Для детального відтворення берегової лінії обраної частини острова Галіндез було використано близько тисячі точок (рис. 3). Після створення закритого ескізу з нього можна створити геометричну

модель острова. Для цього його необхідно підняти на необхідну висоту.

Оскільки на топографічній карті, зображеній на рис. 2, чітко не вказано висоти кожної області, було прийнято рішення кожен контурну область витягувати на один метр вгору над попередньою. Прийmemo, що ескіз першої побудованої області, яка є контуром острова, знаходиться на рівні моря. Отже, вона витягується на один метр над рівнем моря.

Побудова кожного наступного рівня також починалася із формування ескізу шляхом виокремлення сплайнами відповідного контуру на топологічній карті місцевості, після чого витягувалася на один метр вгору. Основою кожного такого ескізу була верхня грань тривимірної моделі попереднього рівня.

Аналогічно було побудовано усі інші контурні лінії з топологічної карти. Результат цієї побудови зображено на рис. 4 (шар з імпортованою топологічною картою виключено з відображення).

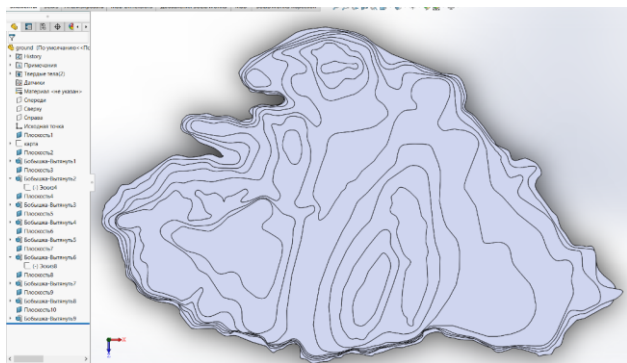


Рис. 4 – Геометрична модель району станції Академік Вернадський, вигляд зверху

Після готовності усіх необхідних елементів типу «Деталь» їх можна поєднати, створивши складальну одиницю. Для цього у робоче середовище SolidWorks імпортуються усі створені на попередніх етапах геометричні моделі, починаючи з рельєфу місцевості й закінчуючи об'єктами інфраструктури станції, а також розміщуються на місцевості у відповідності до план-схеми.

Додатково створено та розміщено на складальній одиниці модель дерев'яного помосту, який знаходиться між основними будівлями станції. Завершено складальну одиницю зображено на рис. 5.

Імітаційне моделювання

У якості основного програмного комплексу скінчено-елементного аналізу для проведення імітаційного моделювання української станції Академік Вернадський було обрано ANSYS, який є одним із світових лідерів у області імітаційного моделювання. У якості додаткової системи

моделювання процесів та явищ гідро- та газодинаміки було обрано програмну систему FlowVision.

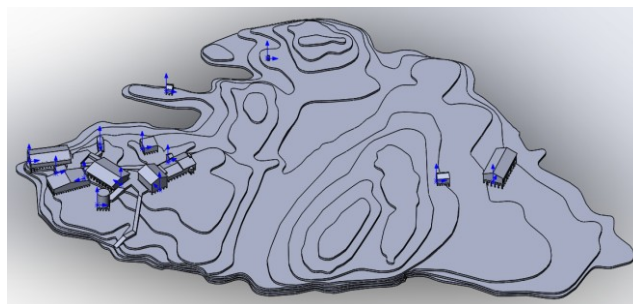


Рис. 5 – Складальна одиниця району станції Академік Вернадський, вигляд збоку

Для проведення імітаційного моделювання статичного впливу повітряного потоку в межах станції необхідно додатково створити модель повітряного простору. Дана геометрична модель являє собою паралелепіпед, з якого вирізана спрощена (частково обмежена) модель станції (рис. 6).

У відповідності до [16] середня швидкість вітру в районі станції Академік Вернадський становить 35 м/с, а максимальна – 45 м/с. Це означає, що об'єкти інфраструктури станції (будівлі та резервуари) потенційно знаходяться в несприятливих умовах експлуатації. Тривалий вплив вітрового навантаження зі значною швидкістю повітряного потоку може призводити до виникнення та розвитку тріщин (через взаємодію з низькою температурою навколишнього середовища), появи надмірних напружень та залишкових деформацій, тощо.

Для визначення векторних полів швидкості повітряного потоку та його тиску, які показують величину та напрямок розподілу вимірюваної величини по певній геометричній моделі (її частині, площині, тощо), було проведено імітаційне моделювання впливу вітрового навантаження в програмному модулі ANSYS CFX на станцію за допомогою відповідної геометричної моделі при швидкостях повітряного потоку нижче середнього (25 м/с) і вище середнього (максимум 45 м/с). Моделювання для швидкості 0,01 м/с не проводилося, тому що повітря у даному випадку є майже нерухомим.

Маючи геометричну модель повітряного середовища, можна приступати до створення її сіткової моделі. Для цього у розділі «Mesh» модуля ANSYS CFX було проведено побудову сітки на усіх елементах наявної геометричної моделі. Проте результуюча сіткова модель виявилася занадто складною (містила більше п'ятнадцяти мільйонів скінчених елементів та мала час побудови близько ста восьмидесяти семи годин). Тож для перевірки її адекватності та визначення основних недоліків було прийнято рішення спростити початкову складальну

одиницю шляхом обмеження побудованої території (рис. 6).

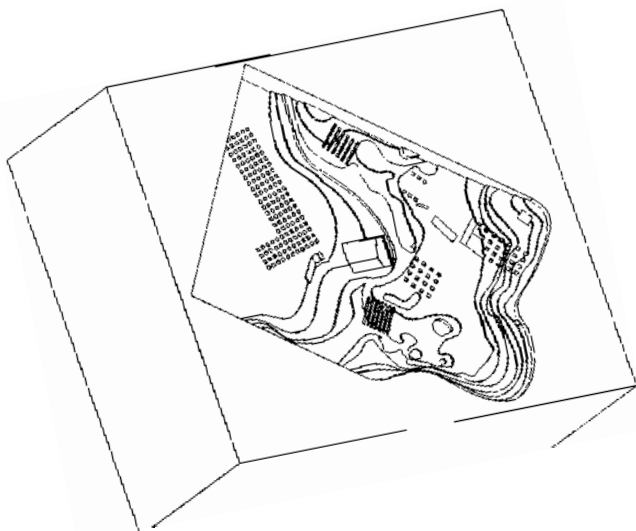


Рис. 6 – Геометрична модель повітряного простору навколо станції

Один цикл створення сіткової моделі для спрощеної геометричної моделі займав близько шестидесяти п'яти годин, а така модель містила 5 423 825 скінчених елементів та 1 024 253 вузлів. Результуючу сіткову модель району станції зображено на рис. 7.

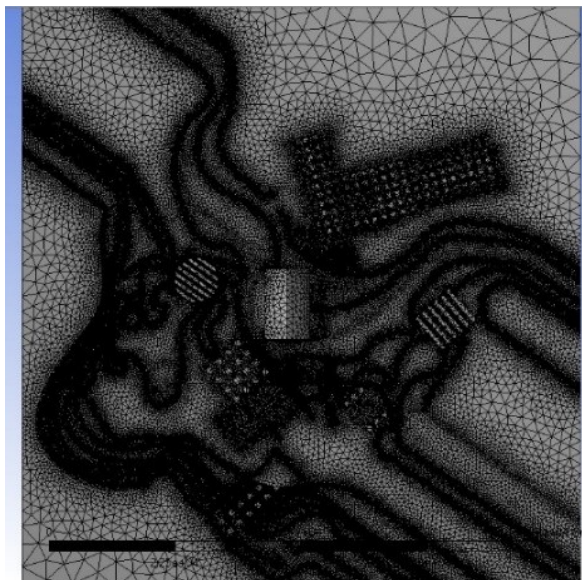


Рис. 7 – Сіткова модель району станції Академік Вернадський

Створення розрахункової моделі відбувалося шляхом визначення основних граничних умов (швидкість та турбулентність вітру, його напрямок, початкова площина, непроникні об'єкти, тощо) та

коефіцієнтів, які впливають на розрахунок. Для оцінки адекватності побудованих моделей було прийнято обрати за основні напрямки повітряного потоку вітер з океану та з материка. Це пов'язано з тим, що ці два напрямки вітру найсильніше впливають на вертикальний циліндричний сталевий резервуар.

Один розрахунок спрощеної моделі (рис. 7) займав біля 120 годин. Результати розрахунків показано на рис. 8 – рис. 11.

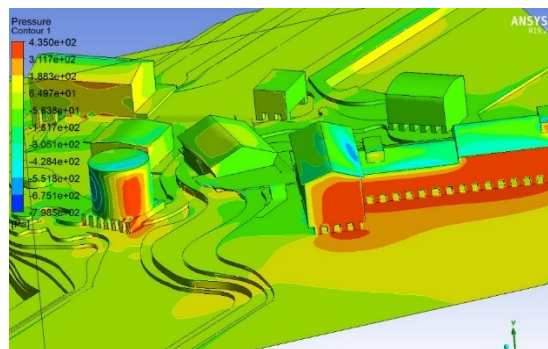


Рис. 8 – Поле тиску, вітер з материка (збільшений вигляд)

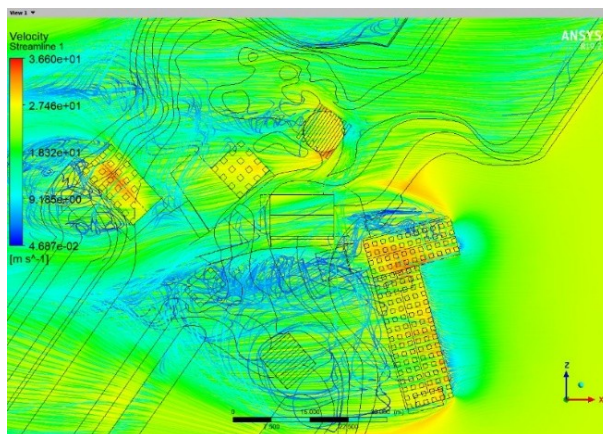


Рис. 9 – Векторне поле швидкості, вітер з материка (вид знизу)

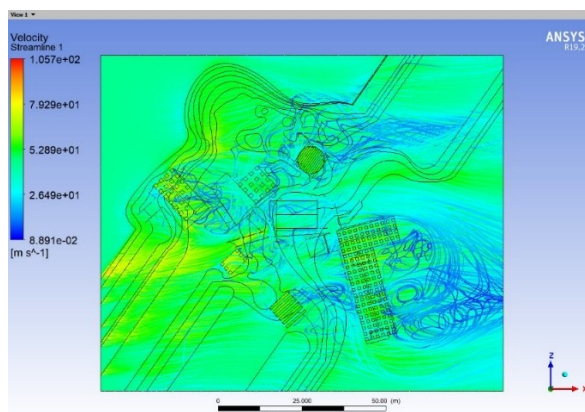


Рис. 10 – Векторне поле тиску, вітер з океану (вид знизу)

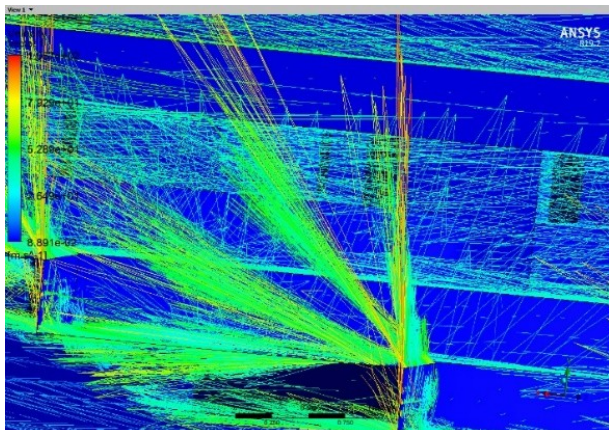


Рис. 11 – Векторне поле тиску, вітер з океану, обтікання елементів місцевості

Аналіз полів вітрового тиску (рис. 8) дав змогу визначити найбільш навантажені елементи інфраструктури станції Академік Вернадський у випадках дії вітру з материка та з океану. Найбільш навантаженими елементами інфраструктури є основна будівля та паливний бак у разі дії вітру з материка. Деяко менше навантаження приходить на столярну майстерню у цьому ж випадку.

Для випадку дії вітру з материка також характерне прискорення повітряних потоків при обтіканні елементів інфраструктури, які зустрічаються першими на його шляху: головної будівлі та вертикального циліндричного сталевго резервуару (рис. 9). Також показано, що у даному випадку паливний фундамент об'єктів інфраструктури станції має вплив на результати моделювання.

На відміну від вітру з материка, вітер з океану показав іншу, більш безпечну, картину (рис. 10) тиску повітряного потоку на елементи інфраструктури. Проте, якщо провести більш детальний аналіз результатів, то можна побачити (рис. 11), що наявність перпендикулярних елементів місцевості (переходи з одного рівня висоти на інший) призводить до розбивання повітряних потоків об них та їх розділенні на чотири основні напрямки векторів руху: горизонтально по поверхні, вертикально вгору, під кутами приблизно 30° та 60° до горизонталі. Це може призводити до спотворення загальної картини розподілу тиску по поверхні геометричної моделі та відхилення інших векторів швидкості. Саме тому необхідно в майбутньому провести додаткові дослідження на моделі, в якій усі прями кути на місцевості будуть замінені на тупі (гострі) або заокруглені для визначення впливу на параметри обтікання та розподілу вітрового тиску.

Також аналіз отриманих результатів показав, що для обох розглянутих випадків характерною є стабільність розподілу тиску та векторів повітряного потоку в межах геометричної моделі незалежно від величини швидкості вітру (25 м/с та 45 м/с). У обох розглянутих випадках присутнє формування значного

турбулентного хвоста за елементами інфраструктури станції (рис. 9, рис. 10) через наявність паливного фундаменту. Ці турбулентні хвости низької швидкості можуть стати причиною формування заметів.

Одне з завдань будь-якого моделювання полягає в забезпеченні його достатньої точності. Похибки імітаційного моделювання зумовлюються об'єктивними причинами (наприклад, спрощення реальних явищ, об'єктів чи процесів) та суб'єктивними (наприклад, недостатність знань і навичок людини-дослідника). Похибки можна врахувати, компенсувати або, в ідеальному випадку, уникнути. Саме тому треба провести всебічну оцінку отриманих результатів. Швидко це можна зробити, наприклад, перевіривши результат на: відповідність фізичному сенсу, виконання окремих умов, дотримання тенденцій зміни знаків чи величин, (монотонність, циклічність, плавність, тощо), розмірність (порядок), тощо.

Тож для забезпечення достатньої точності та узгодження результатів імітаційного моделювання необхідно в майбутніх роботах додатково провести аналітичний розрахунок вітрового навантаження на об'єкти інфраструктури станції Академік Вернадський, а також експериментальні дослідження для схожих з моделюванням умов. Це дасть змогу перекопатися у правильності прийнятих у ході імітаційного моделювання припущень та за необхідності розробити план заходів для протидії вітровому та сніговому навантаженням.

Висновки

На сьогоднішній день проблема протидії складним погодним умовам в районі Антарктики вирішується за рахунок впровадження нових архітектурних рішень, які по ряду причин неможливо реалізувати на українській антарктичній станції Академік Вернадський. Неправильний вибір металу для деяких об'єктів інфраструктури української станції також створює додатковий ризик для життя персоналу станції. Ці невіршені проблеми потребують розроблення комплексу заходів, що у тій чи іншій мірі зменшать негативний вплив.

Саме тому у даній роботі створено геометричні моделі та виконано імітаційне моделювання об'єктів інфраструктури української антарктичної станції Академік Вернадський в умовах вітрового навантаження. Показано, що у випадку дії вітру з материка елементами інфраструктури станції, що сприймають основне вітрове навантаження, є головна будівля та РВС-200. Визначено, що наявність паливного фундаменту впливає на векторні поля швидкості, тож даним елементом не бажано нехтувати при виконанні подальших досліджень. Показано, що практично всі об'єкти інфраструктури станції призводять до виникнення значних турбулентних хвостів при їх обтіканні.

У майбутньому необхідно провести додаткові дослідження вітрового навантаження з напрямками повітряного потоку у відповідності до рози вітрів району станції Академік Вернадський. Це дасть змогу визначити точні напрямки турбулентних хвостів для розроблення комплексу заходів протидії вітровому та сніговому навантаженню на об'єкти інфраструктури станції. Також необхідно провести аналітичний розрахунок та експериментальні дослідження для визначення точності результатів імітаційного моделювання.

Список літератури

1. Accidents can happen. URL: <https://blogs.esa.int/concordia/2012/04/04/accidents-can-happen/> (дата звернення: 20.01.2022).
2. Xin Z. Be careful, Here is Antarctica – the statistics and analysis of the grave accidents in Antarctica. 2010. URL: <https://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/handle/10092/13919/Xin%20Zhang%20Antarctic%20accidents.pdf> (дата звернення: 20.01.2022).
3. Antarctic research base goes up in flames. *New Scientist*. 2012. Vol. 213. Iss. 2854. P. 5. doi: 10.1016/S0262-4079(12)60530-2.
4. Two die in fire at Brazil's Antarctic research station. URL: <https://www.bbc.com/news/world-latin-america-17168526> (дата звернення: 20.01.2022).
5. Colabuono F., Taniguchi S., Cipro C., da Silva J., Bicego M., Montone R. Persistent organic pollutants and polycyclic aromatic hydrocarbons in mosses after fire at the Brazilian Antarctic Station. *Marine Pollution Bulletin*. 2015. Vol. 93. Iss. 1–2. P. 266–269. doi: 10.1016/j.marpolbul.2015.01.018.
6. Brooks S., Jabour J., Sharman A., Bergstrom D. An analysis of environmental incidents for a national Antarctic program. *Journal of Environmental Management*. 2018. Vol. 212. P. 340–348. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.02.024.
7. Guerra M., Neto E., Prianti M., Pereira-Filho E., Schaefer C. Post-fire study of the Brazilian Scientific Antarctic Station: Toxic element contamination and potential mobility on the surrounding environment. *Microchemical Journal*. 2013. Vol. 110. P. 21–27. doi: 10.1016/j.microc.2013.01.007.
8. Cereceda-Balic F., Vidal V., Ruggeri M., González H. Black carbon pollution in snow and its impact on albedo near the Chilean stations on the Antarctic peninsula: First results. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 743. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140801.
9. Jiang M., Pang X., Chen H., Chen D. Ecological integrity evaluation along the antarctic coast: A case study on the Fildes Peninsula. *Continental Shelf Research*. 2022. Vol. 242. doi: 10.1016/j.csr.2022.104747.
10. Кондрашова О. Г., Назарова О. М. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров. *Нефтегазовое дело*. 2004. № 2. С. 21–29.
11. Купреишвили С.М. Разрушения в процессе эксплуатации вертикальных цилиндрических резервуаров со стационарной крышей. *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2005. № 7. С. 8–14.
12. Wang J., Wang M., Yu X., Zong R., Lu S. Experimental and numerical study of the fire behavior of a tank with oil leaking and burning. *Process Safety and Environmental*

- Protection*. 2022. Vol. 159. P. 1203–1214. doi: 10.1016/j.psep.2022.01.047.
13. Mirzaei M., Malekan M., Sheibani E. Failure analysis and finite element simulation of deformation and fracture of an exploded CNG fuel tank. *Engineering Failure Analysis*. 2013. Vol. 30. P. 91–98. doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.01.015.
14. Bouraou N., Lukianchenko O., Tsybulnik S., Shevchuk D. Vibration condition monitoring of the vertical steel tanks. *Vibrations in Physical Systems*. 2016. 27. P. 55–60.
15. Жук Г. В., Мороз И. В., Барвинко А. Ю., Барвинко Ю. П., Посыпайко Ю. Н. Особенности строительства и эксплуатации резервуара РВС-200 для хранения дизельного топлива в Антарктиде на станции «Академик Вернадский». *Автоматическая сварка*. 2017. № 2. С. 36–40.
16. The Replacement of Fuel Tanks at Vernadsky Station. URL: http://www.ats.aq/documents/ATCM30/ip/ATCM30_ip030_e.doc (дата звернення: 06.12.2021).

References (transliterated)

1. Accidents can happen. Available at: <https://blogs.esa.int/concordia/2012/04/04/accidents-can-happen/> (Accessed Jan. 20, 2022).
2. Xin Z. Be careful, Here is Antarctica – the statistics and analysis of the grave accidents in Antarctica. 2010. Available at: <https://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/handle/10092/13919/Xin%20Zhang%20Antarctic%20accidents.pdf> (Accessed Jan. 20, 2022).
3. Antarctic research base goes up in flames. *New Scientist*, 2012, Vol. 213, Iss. 2854, p. 5, doi: 10.1016/S0262-4079(12)60530-2.
4. Two die in fire at Brazil's Antarctic research station. Available at: <https://www.bbc.com/news/world-latin-america-17168526> (Accessed Jan. 20, 2022).
5. Colabuono F., Taniguchi S., Cipro C., da Silva J., Bicego M., Montone R. Persistent organic pollutants and polycyclic aromatic hydrocarbons in mosses after fire at the Brazilian Antarctic Station. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, Vol. 93, Issues 1–2, pp. 266–269, doi: 10.1016/j.marpolbul.2015.01.018.
6. Brooks S., Jabour J., Sharman A., Bergstrom D. An analysis of environmental incidents for a national Antarctic program. *Journal of Environmental Management*, 2018, Vol. 212, pp. 340–348, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.02.024.
7. Guerra M., Neto E., Prianti M., Pereira-Filho E., Schaefer C. Post-fire study of the Brazilian Scientific Antarctic Station: Toxic element contamination and potential mobility on the surrounding environment. *Microchemical Journal*, 2013, Vol. 110, pp. 21–27, doi: 10.1016/j.microc.2013.01.007.
8. Cereceda-Balic F., Vidal V., Ruggeri M., González H. Black carbon pollution in snow and its impact on albedo near the Chilean stations on the Antarctic peninsula: First results. *Science of The Total Environment*, 2020, Vol. 743, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140801.
9. Jiang M., Pang X., Chen H., Chen D. Ecological integrity evaluation along the antarctic coast: A case study on the Fildes Peninsula. *Continental Shelf Research*, 2022, Vol. 242, doi: 10.1016/j.csr.2022.104747.
10. Kondrashova O. G., Nazarova O. M. Cause-and-effect analysis of vertical steel tank accidents. *Neftegazovoe delo*, 2004, Vol. 2, pp. 21–29.

11. Kupreishvili S. M. Destruction during operation of vertical cylindrical tanks with a fixed roof. *Montazhnye i special'nye raboty v stroitel'stve*, 2005, Vol. 7, pp. 8–14.
12. Wang J., Wang M., Yu X., Zong R., Lu S., Experimental and numerical study of the fire behavior of a tank with oil leaking and burning. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, Vol. 159, pp. 1203–1214, doi: 10.1016/j.psep.2022.01.047.
13. Mirzaei M., Malekan M., Sheibani E., Failure analysis and finite element simulation of deformation and fracture of an exploded CNG fuel tank. *Engineering Failure Analysis*, 2013, Vol. 30, pp. 91–98, doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.01.015.
14. Bouraou, N., Lukianchenko, O., Tsybulnik, S., Shevchuk, D. Vibration condition monitoring of the vertical steel tanks. *Vibrations in Physical Systems*, 2016, 27, pp. 55–60.
15. ZHuk G. V., Moroz I. V., Barvinko A. Yu., Barvinko Yu. P., Posypajko Yu. N. Features of the construction and operation of the RVS-200 tank for storing diesel fuel in Antarctica at the Vernadsky station. *Avtomaticheskaya svarka*, 2017, Vol. 2, pp. 36-40.
16. The Replacement of Fuel Tanks at Vernadsky Station. Available at: http://www.ats.aq/documents/ATCM30/ip/ATCM30_ip030_e.doc (Accessed Dec. 06, 2021).

Відомості про авторів (About authors)

Цибульник Сергій Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, КПП ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри приладів і систем орієнтації і навігації; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-4462-0936; e-mail: tsybulnik.s.a@gmail.com.

Tsybulnyk Serhii – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor of Department of Orientation and Navigation Instruments and Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4462-0936; e-mail: tsybulnik.s.a@gmail.com.

Накорик Вікторія Валентинівна – студент кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-4851-4740.

Nakoryk Viktoriia – student, Department of Computer-Integrated Optical and Navigation Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4851-4740.

Рупіч Сергій Сергійович – кандидат технічних наук, асистент, КПП ім. Ігоря Сікорського, кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-8237-7001.

Rupich Serhii – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Assistant, Department of Computer-Integrated Optical and Navigation Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8237-7001.

Півторак Діана Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, КПП ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри приладів і систем орієнтації і навігації; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-3708-5610.

Pivtorak Diana – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor of Department of Orientation and Navigation Instruments and Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3708-5610.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Цибульник С. О., Накорик В. В., Рупіч С. С., Півторак Д. О. Модельовання повітряного потоку в районі української антарктичної станції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 61-68. doi:10.20998/2413-4295.2022.02.09.

Please cite this article as:

Tsybulnyk S., Nakoryk V., Rupich S., Pivtorak D. Airflow simulation at the Ukrainian Antarctic station. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 2(12), pp. 61–68, doi:10.20998/2413-4295.2022.02.09.

Надійшла (received) 06.06.2022