

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА ЛЬОТНА АКАДЕМІЯ

Факультет авіаційного менеджменту
Кафедра аеронавігації, метеорології та організації повітряного руху

ГЕРАСЬОВ ВІКТОР АНДРІЙОВИЧ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Модель впливу зсуву вітру на політ повітряного судна на фінальному
етапі заходу на посадку**

Спеціальність 272 «Авіаційний транспорт»

ОПП «Управління повітряним рухом»

Освітній ступінь - магістр

«Допустити до захисту»

Завідувач кафедри:

к.т.н., доцент _____ Н.І. Кушнієрова

« _____ » _____ 2025 р.

Науковий керівник:

к.т.н., доцент, _____ Н.І. Кушнієрова

Робота захищена:

« _____ » _____ 2025 р.

з оцінкою _____

Голова ЕК _____

Кропивницький 2025 р.

АНОТАЦІЯ

Виходячи із загальносвітової тенденції щодо підвищення інтенсивності повітряного руху та обсягів повітряних перевезень ми можемо прогнозувати, що інтенсивність повітряного руху в Україні після відновлення польотів цивільних повітряних суден постійно зростатиме. Це означає подальше підвищення робочого навантаження авіадиспетчера. За статистикою ресурсу Worldwide Aviation Safety частку авіаційних подій, що відбулися на етапах зльоту, початкового набору висоти і фінального етапу заходу на посадку припадає близько 56% загальної кількості авіаційних подій. Цей факт доводить, що пильна увага до цих етапів є виправданою. У нашій роботі ми моделюємо таке небезпечне метеорологічне явище як зсув вітру на малих висотах. Особливу увагу ми приділяємо етапу фінального заходу на посадку, який припадає близько 36% авіаційних подій.

У дипломній роботі розроблено модель обліку впливу зсуву вітру на політ ПС на фінальному етапі заходу на посадку, модель реакції екіпажу ПС на зсув вітру та прийняття рішення про виконання повторного заходу на посадку, що дозволить підвищити якість моделювання динамічної повітряної обстановки в умовах зсуву вітру.

Отримані моделі дозволять підвищити достовірність моделювання динамічної повітряної обстановки при виконання польотів ПС в умовах зсуву вітру в тренажерах авіадиспетчерів.

Пояснювальна записка включає: _____ сторінок , _____ малюнків , _____ таблиць , _____ літературних джерел.

ANNOTATION

Based on the global trend of increasing the intensity of air traffic and the volume of air transportation, we can predict that the intensity of air traffic in Ukraine will continue to grow after the resumption of civil aircraft flights. This means a further increase in the air traffic controller's workload. According to the statistics of the Worldwide Aviation Safety resource, the share of aviation events that occurred during the take-off, initial climb and final approach stages accounts for about 56% of the total number of aviation events. This fact proves that close attention to these stages is justified. In our work, we simulate such a dangerous meteorological phenomenon as wind shear at low altitudes. We pay special attention to the stage of the final approach to landing, which accounts for about 36% of aviation events.

The thesis developed a model for accounting for the effect of wind shear on the flight of an aircraft at the final stage of the approach, a model of the reaction of the aircraft crew to wind shear and making a decision to perform a repeated approach, which will improve the quality of modeling the dynamic air situation in conditions of wind shear.

The resulting models will allow to increase the reliability of modeling the dynamic air situation during aircraft flights in wind shear conditions in air traffic controllers' simulators.

The explanatory note includes: _____ pages, _____ figures, _____ tables, _____ literature sources.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ЯВИЩ, ЩО ПРИЗВОДЯТЬ ДО ВИНИКНЕННЯ ЗСУВУ ВІТРУ	10
1.1 Вітер у приземному шарі	11
1.2 Обтікання перешкод вітром	18
1.3 Фронтальні поверхні	24
1.4 Вплив грозової діяльності	27
РОЗДІЛ 2. ЗСУВ ВІТРУ НА МАЛИХ ВИСОТАХ І ЙОГО ВПЛИВ НА ЛЬОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН	31
2.1 Вітер та зміна його характеристик	31
2.2 Розрахунок зсуву вітру	33
2.3 Вплив зсуву вітру на повітряну швидкість	37
2.4 Вплив зсуву вітру на зліт та посадку повітряного судна	39
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ЗСУВУ ВІТРУ ДЛЯ МОДЕЛЮЮЧОГО КОМПЛЕКСУ РОБОТИ АВІАДИСПЕТЧЕРА	42
3.1 Підготовка персоналу служби управління повітряним рухом	43
3.2 Удосконалення моделі польоту повітряного судна для моделюючого комплексу	46
3.3 Модель обліку впливу зсуву вітру для моделюючого комплексу роботи авіадиспетчера	51
ВИСНОВКИ	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	63

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АДВ	аеродромно-диспетчерська вишка
АС УПР	автоматизована система управління повітряним рухом
АП	авіаційна подія
АТ	авіаційний транспорт
АТС	авіаційна транспортна система
БП	безпека польотів
ВЛП	весняно-літній період
ВОРЛ	вторинний оглядовий радіолокатор
ВПР	висота прийняття рішення
ЕПС	екіпаж повітряного судна
ЗПС	злітно-посадкова смуга
ІКАО	Міжнародна організація цивільної авіації
КП	керівник польотів
КС	конфліктна ситуація
ЛА	літальний апарат
ЛА НАУ	льотна академія Національного авіаційного університету
МК	моделюючий комплекс
НСЦ	Навчально-сертифікаційний центр
РСП	регіональний структурний підрозділ
ОЗП	осінньо-зимовий період
ОПР	обслуговування повітряного руху
ОрПР	організація повітряного руху
ПІО	польотно-інформаційне обслуговування
ПЗ	програмний засіб
ПКС	потенційно конфліктна ситуація
ПР	повітряний рух

ПС	повітряне судно
РДЦ	районний диспетчерський центр
СОПР	служба обслуговування повітряного руху
ТЦ	тренажерний центр
УПР	управління повітряним рухом
EANPG	Європейська група аеронавігаційного планування
ICAO	International Civil Aviation Organization
SARPS	Standards And Recommended Practice - Стандарти і рекомендована практика
DSS	Decision Support System
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
STCA	Short Term Conflict Alert
TMA	Terminal Control Area
CTR	Control Zone
ADS	Automatic Dependent Surveillance
AFIS	Aerodrome Flight Information Service
ACP	Area Control Procedural Rating
ACS	Area Control Surveillance Rating
APP	Approach Control Procedure
APS	Approach Control Surveillance Rating
APS	Approach Control Surveillance
ARO	ATS Reporting Office
AIS	Aeronautical information
ASM	Airspace Management

ВСТУП

За даними Міжнародної організації цивільної авіації з усіх катастроф у період із 1964 по 1993 роки 39% пов'язані з метеорологічними чинниками, як-от зрушення вітру і турбулентність. Тому останніми роками у світі проводяться інтенсивні дослідження питань забезпечення безпеки польотів повітряних суден за умов зсуву вітру та інших аномальних явищ атмосфери. Найбільш характерний та повний аналіз статистики авіаційних подій, пов'язаних зі зсувом вітру в період з 1983 по 1997 роки, можна провести за інформацією Національного бюро США з безпеки на транспорті (NTSB). З аналізу опублікованої інформації про авіаційні події, що мали місце в повітряному просторі США і пов'язаних зі сдвгтом вітру, випливає, що в повітряному просторі США за період з 1983 по 1997 роки сталося 185 авіаційних подій, прямо чи опосередковано пов'язаних зі зсувом вітру, 257 осіб.

Усього постраждалих в авіаційних подіях, пов'язаних зі зсувом вітру, за вказаний період – 2037 пасажирів та членів екіпажів повітряних суден, з них загинуло, як зазначалося вище, 257 осіб, а тяжко поранено – 143 особи. Найбільша кількість загиблих припадає на 1985 та 1990 роки.

Виходячи із загальносвітової тенденції щодо підвищення інтенсивності повітряного руху та обсягів повітряних перевезень ми можемо прогнозувати, що інтенсивність повітряного руху в Україні після відновлення польотів цивільних повітряних суден постійно зростатиме. Внаслідок обмеженості пропускної спроможності повітряного простору це означає подальше підвищення робочого навантаження авіадиспетчера. За останні 15 років у світі, згідно з дослідженнями Міжнародної організації цивільної авіації, недоліки управління повітряним рухом, самотійно або в комплексі з помилкою пілота повітряного судна, спричинили 15,2% серед усіх авіаційних подій з вини людського чинника. Підвищення якості управління повітряним рухом є одним із пріоритетних напрямів підвищення безпеки польотів ще й

тому, що у 61% авіаційних подій, чинником яких виступила помилка диспетчера, брало участь 2 та більше повітряних суден.

За статистикою ресурсу Worldwide Aviation Safety частку авіаційних подій, що відбулися на етапах зльоту, початкового набору висоти і фінального етапу заходу на посадку припадає близько 56% загальної кількості авіаційних подій. Цей факт доводить, що пильна увага до цих етапів є виправданою. У нашій роботі ми моделюємо таке небезпечне метеорологічне явище як зсув вітру на малих висотах. Особливу увагу ми приділяємо етапу фінального заходу на посадку, який припадає близько 36 відсотків авіаційних подій.

Метою нашої роботи є розробка моделі впливу небезпечного метеорологічного явища «зсув вітру» на політ повітряного судна на фінальному етапі заходу на посадку.

Об'єкт дослідження – модель динамічної повітряної обстановки у диспетчерських тренажерах.

Предмет - моделювання впливу зсуву вітру малих висотах на політ повітряного судна.

Для досягнення мети роботи поставлено та вирішено наступні **завдання**:

1. вивчити метеорологічні явища, що призводять до зсуву вітру та розглянути явище зсуву вітру на малих висотах;
2. дослідити вплив зсуву вітру на льотні характеристики повітряних суден на етапі заходу на посадку;
3. на основі існуючої моделі польоту повітряного судна в моделюючому комплексі розробити модель впливу зсуву вітру на політ повітряного судна на фінальному етапі заходу на посадку;
4. розробити модель прийняття рішення екіпажем повітряного судна щодо виконання повторного заходу на посадку при перевищенні допустимих параметрів.

Методи, використані у роботі: у роботі використовувалися такі методи теоретичного рівня:

- метод аналізу застосовувався з метою дослідження в галузі безпеки польотів, а також регламентуючих документів з питань діяльності диспетчера управління повітряним рухом при забезпеченні польотів повітряних суден, літературних джерел з питань характеристик повітряного руху та безпеки польотів, метеорологічного забезпечення польотів тощо;
- метод узагальнення проводився з метою обґрунтування актуальності проблеми дослідження, визначення основних напрямів створення моделі;
- метод моделювання використовується у роботі для побудови моделі небезпечного метеоявлення та моделі поведінки ВС.

У роботі використовуються такі методи емпіричного рівня:

- вимірювання та порівняння застосовуються для визначення кількісних характеристик моделей;
- спостереження (аналіз результатів автоматизованого формування вправ модульним методом) дозволило підтвердити актуальність нашого дослідження.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що було вдосконалено модель польотних даних повітряних суден для моделюючого комплексу роботи авіадиспетчера (диспетчерський тренажер), розроблено модель прийняття рішення екіпажем повітряного судна про припинення виконання заходу на посадку при перевищенні допустимих параметрів.

Практичне значення роботи визначається спрямованістю підвищення якості моделювання динамічної повітряної обстановки на фінальному етапі заходу на посадку з урахуванням впливу зсуву вітру. Новими практичними результатами є удосконалення моделі польотних даних повітряних суден та

розробка моделі прийняття рішення екіпажем повітряного судна про припинення виконання заходу на посадку у разі перевищення допустимих параметрів. Розроблену модель польотних даних ПС впроваджено в електронну бібліотеку моделюючого комплексу.

Публікації: результати дослідження були опубліковані в наукових тезах:

1. Герасьов В.А., Кушнірова Н.І., Землянський А.В., Підготовка диспетчерів управління повітряним рухом до попадання повітряних суден у зсув вітру / V Міжнародна науково-практична конференція «АВІАЦІЯ, ПРОМИСЛОВІСТЬ, СУСПІЛЬСТВО», 16 травня 2024 року, м. Кременчук.

2. Герасьов В.А., Кушнірова Н.І., Модель впливу зсуву вітру на польот повітряного судна / LII Міжнародна науково-практична конференція «Scientific Research in the Age of Virtual Reality: Exploring New Frontiers» (December 18-20, 2024) Montreal, Canada, International Scientific Unity, 2024. 307 p.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ЯВИЩ, ЩО ПРИЗВОДЯТЬ ДО ВИНИКНЕННЯ ЗСУВУ ВІТРУ

Успішна побудова моделі зсуву вітру для тренажера аеродромної диспетчерської вишки вимагає насамперед вивчення причин, які можуть спричинити виникнення небезпечного метеорологічного явища зсув вітру.

Поняття зсуву вітру на малих висотах у найширшому значенні слова охоплює сукупність переміщень повітря в нижніх шарах атмосфери, від невеликих завихрень і поривів, які можуть впливати на повітряне судно у вигляді турбулентності, до потужного переміщення повітряної маси одного шару відносно сусіда. Широкий діапазон різноманітних явищ, що можуть створювати такі потоки повітря, включає грози, берегові та морські бризи, струменеві течії на малих висотах, гірські хвилі та фронтальні системи. Щоб знайти в даному конкретному контексті той спільний знаменник, який пов'язує такі різноманітні явища, необхідно роз'яснити значення терміна "зсув вітру". Найбільш загальне визначення зсуву вітру виглядає наступним чином: "Зміна швидкості та/або напрямки вітру в просторі, включаючи висхідні та низхідні потоки повітря".

З такого роз'яснення випливає, що будь-яке атмосферне явище або навіть будь-яка фізична перешкода на шляху переважаючого повітряного потоку, що призводить до зміни швидкості та напрямку вітру, по суті, є причиною зсуву вітру.

Зсув вітру є в атмосфері практично завжди, і це явище часто можна спостерігати. Прикладами можуть бути шари хмарності на різних висотах, що рухаються в різних напрямках; шлейфи диму, зрізані по висотах і що рухаються у різних напрямках; зважені частинки, що обертаються, та або краплі води у відносно нешкідливих пилових вихорах і надзвичайно небезпечних водяних смерчах і торнадо; "стіно подібна" передня кромка пилових та піщаних бур та дерева, що хилиться у всіх напрямках під

раптовими поривами фронту шквалів. Всі ці видимі ефекти свідчать про повсюдну присутність в атмосфері зсуву вітру та явищ, що його викликають.

Важливість зсуву вітру для авіації полягає у його впливі на льотні характеристики повітряних суден і, як наслідок, потенційно несприятливому впливу на безпеку польотів. Хоча зсув вітру може бути в атмосфері на всіх висотах, його наявність на висоті нижче 500 метрів (1600 футів) особливо важлива для повітряних суден, що виробляють посадку та зліт. На етапах початкового набору висоти та заходу на посадку значення повітряної швидкості та відносної висоти повітряного судна близькі до критичних, завдяки чому повітряне судно особливо сприйнятливе до несприятливого впливу зсуву вітру. Як стане ясно з наступних розділів цього циркуляру, реакція повітряного судна на зсув вітру є надзвичайно складною і залежить від багатьох факторів, включаючи тип повітряного судна, етап польоту, масштаб впливу зсуву вітру щодо розмірів повітряного судна, інтенсивність та тривалість впливу зсуву вітру на повітряне судно..

1.1 Вітер у приземному шарі

Навіть поза сферою впливу особливих метеорологічних явищ, що викликають зсув вітру, останній завжди присутній в атмосфері, хоча за нормальних обставин такий зсув вітру не створює труднощів для екіпажів повітряних суден. Це особливо помітно на висотах менше 600 метрів (2000 футів), де опір, створюваний тертям повітря у безпосередній близькості від поверхні землі, викликає зміну швидкості та напрямки вітру у міру зміни висоти. Такий шар зазвичай називають "шаром тертя", і він, у свою чергу, може поділятися на наступні шари:

а) "поверхневий прикордонний шар" від поверхні землі до висоти близько 100 метрів (330 футів), де рух повітря визначається переважно тертям про поверхню землі;

б) “шар Екмана” від висоти близько 100 метрів (330 футів) до висоти не менше 600 метрів (2000 футів), де вплив тертя, хоча ще значний, послідовно зменшується зі збільшенням висоти, а інші фактори, що впливають, такі як сили Коріоліса і горизонтальний баричний градієнт, набувають все більш важливого значення.

У шарі тертя швидкість вітру має тенденцію до зростання зі збільшенням висоти по всьому шару, причому найбільші зміни відбуваються безпосередньо над землею в поверхневому граничному шарі. Напрямок вітру, як правило, залишається незмінним зі збільшенням висоти в межах поверхневого прикордонного шару, але повертає за годинниковою стрілкою (проти годинникової стрілки) зі збільшенням висоти в північній (південній) півкулі по всьому шару Екмана. Розглянемо ці два типи шарів тертя докладніше.

Поверхневий прикордонний шар

У самому нижньому шарі атмосфери, нижче висоти близько 100 метрів (330 футів), напрям вітру приблизно постійно за висотою, а швидкість вітру, як правило, зростає з висотою, причому ця зміна буває найбільш різкою безпосередньо над поверхнею землі. Виведення на основі фізичних принципів теоретичного взаємозв'язку між швидкістю вітру та висотою в поверхневому прикордонному шарі за всіх можливих умов стійкості пов'язане з певними труднощами. Однак встановлення такого взаємозв'язку для особливих умов нейтральної стійкості (тобто не є ні стійкими, ні нестійкими), у яких фактичний вертикальний градієнт приймається рівним вертикальному градієнту сухої адіабати в ненасиченому повітрі та градієнту насиченої адіабати в насиченому повітрі порівняно з горизонтальним рухом через підйомну силу) є відносно нескладним завданням. Таких умов приблизно дотримано в поверхневому прикордонному шарі, поки є досить сильний вітер, що забезпечує турбулентне змішування. При дуже слабкому вітрі, особливо в умовах штилю з помітною інверсією на малих висотах,

стійко нейтрально шар не встановлюється, і цю теорію застосувати неможливо. Теоретична зміна швидкості вітру за висотою описується "логарифмічним законом вітру" або "рівнянням Прандтля" і служить для побудови добре відомого логарифмічного профілю швидкості вітру:

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0}$$

де u – швидкість вітру на висоті z ;

u^* – “ швидкість тертя ”;

k – постійна Кармана, яка рівна приблизно 0,38;

z_0 – тривалість пересіченості, яка залежить від характеру (пересіченості) конкретної поверхні.

Логарифмічний закон вітру дуже добре збігається з профілем швидкості вітру, що спостерігається, в поверхневому прикордонному шарі, поки виконується умова нейтральної стійкості. У випадках, коли поверхневий прикордонний шар нестійкий, зсув швидкості вітру по висоті буде меншим від передбаченого вищенаведеним рівнянням, а якщо умови стійкі, зсув буде більшим, ніж передбачається за вищевказаним рівнянням (рисунок 1.1).

Екстремальний варіант умови стійкості, який може охоплювати весь шар тертя, має місце, якщо стійкість настільки значна (наприклад, через утворення сильної інверсії випромінювання на малих висотах у нічний час), що турбулентне змішування та перехід кількості руху з великого потоку вище інверсії припиняються . Це призводить до того, що приземний вітер слабшає або настає штиль, і оскільки потік повітря вище рівня інверсії практично відрізаний від сповільнення тертя біля поверхні землі, на вершині інверсії утворюється максимум швидкості вітру (рисунок 1.2).

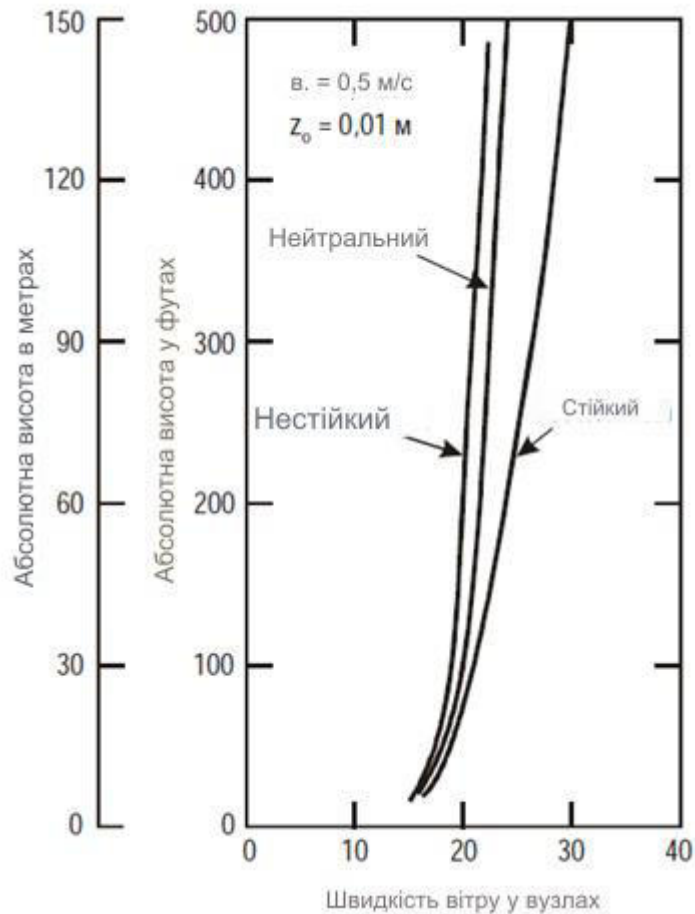


Рис 1.1 Нейтральний, стійкий та нестійкий вітер

За певних обставин, наприклад, якщо повітряний потік відхиляється гірським ланцюгом у напрямку широкої рівнини, максимум швидкості вітру зосереджується у порівняно вузькій смужі, що нагадує струменеву течію. Такі максимуми швидкості вітру зазвичай називають "струменевими течіями на малих висотах". Оскільки максимальна швидкість його може перевищувати 120 кілометрів на годину (60 вузлів), такий опис є цілком виправданим. Цей термін був вперше застосований для опису струменеподібного максимального вітру на малих висотах, що часто спостерігається на Великих рівнинах та інших районах Сполучених Штатів Америки, Скандинавії та на східному узбережжі Саудівської Аравії. У таких обставинах зрушення нижче струменевої течії може бути значним і пропорційним потужності інверсії.

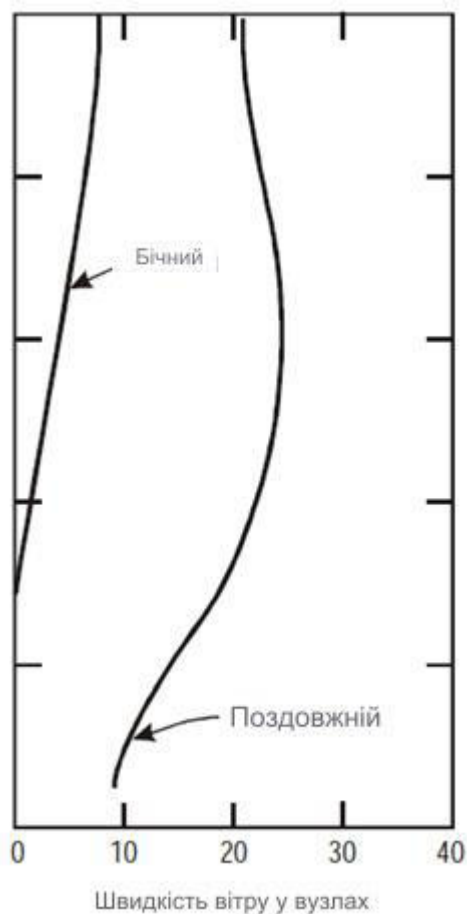


Рис 1.2 Дуже стійкий (струминна течія на малих висотах)

Шар Екмана

Вище поверхневого прикордонного шару на висотах приблизно від 100 метрів (330 футів) до 600 метрів (2000 футів) вплив тертя на вітер швидко зменшується з висотою і наростає переважання горизонтального баричного градієнта і сили Коріоліса. Як і у разі поверхневого прикордонного шару, швидкість вітру на висотах між 100 метрів (330 футів) та 600 метрів (2000 футів) зростає з висотою при зменшенні впливу тертя. Однак напрям вітру не залишається постійним із збільшенням висоти, як це приймалося для поверхневого прикордонного шару, а розгортається за годинниковою стрілкою (проти неї) із збільшенням висоти у північній (південній) півкулі.

Теорія, що дає математичне пояснення цим явищам, вперше була розроблена Екманом, і вона застосовна до атмосфери приблизно між висотами 100 метрів (330 футів) і 600 метрів (2000 футів), тобто в шарі, який

відтоді став відомий як шар Екмана. Рівняння, виведене Екманом, стосовно атмосфери може бути записано наступним чином:

$$u = V_g - V_g \sqrt{2 \sin a e^{-Bz} \cos \left(Bz + \frac{\pi}{4} - a \right)}$$

$$v = V_g \sqrt{2 \sin a e^{-Bz} \sin \left(Bz + \frac{\pi}{4} - a \right)}$$

де u та v – горизонтальні складові вітру на висоті z ;

V_g – геострофічний вітер;

a – кут між напрямками фактичного (на висоті анемометра) та геострофічного вітру;

B – постійна, яка враховує параметри в'язкості та сили Коріолісу.

По всій товщині шару Екмана досягається рівновага між тертям, горизонтальним баричним градієнтом та силою Коріоліса. У нижній частині шару Екмана ці три сили мають величину рівного порядку, і врівноваженість потоку досягається за рахунок вітру, що дме впоперек ізобар у бік зниженого тиску. Кут перетину ізобар цим потоком експоненційно зменшується зі збільшенням висоти в міру ослаблення впливу тертя до тих пір, поки не буде досягнутий висотний рівень, де вплив тертя можна знехтувати, а між горизонтальним баричним градієнтом і силою Коріоліса встановлюється рівновага і вітер дме вздовж ізобар.

Висота, де вітер дме вздовж ізобар, називається висотою геострофічного вітру чи навіть верхньої межею шару тертя. На цій висоті і вище вітер, параметри якого обчислені за теорією Екмана, дуже близький до геострофічного. Згідно з цією теорією, кут перетину ізобар потоком у шарі Екмана становить максимум 45 градусів безпосередньо біля поверхні або трохи вище і експоненційно зменшується на висотах більше приблизно 100 метрів (330 футів) до 0 градусів на верхній межі шару тертя. Якщо обчислений вітер у шарі Екмана уявити у формі годографа, кінцеві точки

векторів вітру описують рівнокутну спіраль, відому під назвою спіралі Екмана (рисунок 1.3).

На практиці з'ясовується, що швидкість вітру в шарі Екмана, як правило, зростає із збільшенням висоти, вітер дме під кутом до ізобарів, цей кут зменшується зі збільшенням висоти і вітер повертає за годинниковою стрілкою (проти неї) із збільшенням висоти у північної (південної) півкулі. Проте, показана на рис. 1.3 спіраль виходить рідко, а поза екваторіальних областей, де значення сили Коріоліса близько до нуля і вітер може дати практично під будь-яким кутом до ізобарів, кут перетину ізобар потоком рідко перевищує 30° . Комбінація логарифмічних профілів вітру та профілів Екмана представляє достовірне відображення "нормального" зсуву вітру (тобто без впливу особливих метеорологічних явищ, що викликають зсув вітру) на висотах від поверхні землі до 600 метрів (2000 футів).

Після проведеної інтенсивної роботи зі створення комплексних систем спостереження за вітром на аеродромах, таких, як комплексна аеродромна метеорологічна система (ITWS) та система визначення профілю вітру, яка використовується як допоміжний елемент у розробленій Федеральним авіаційним управлінням та Національним управлінням з аеронавтики та дослідження космічного простору (NASA) Сполучених Штатів Америки системі ешелонування повітряних суден з урахуванням супутніх вихорів (AVOSS) було зібрано значний обсяг даних про профілі вітру в шарі Екмана та відповідний зсув вітру. Відносно часто виявлялися струменеві течії на малих висотах при швидкості вітру понад 400 кілометрів на годину / 30 метрів (20 вузлів на 1000 футів), і було зареєстровано велику кількість таких випадків при швидкості вітру понад 40 кілометрів на годину / 600 метрів (20 вузлів на 2000 футів) у районі аеропорту Далласа у Сполучених Штатах Америки.

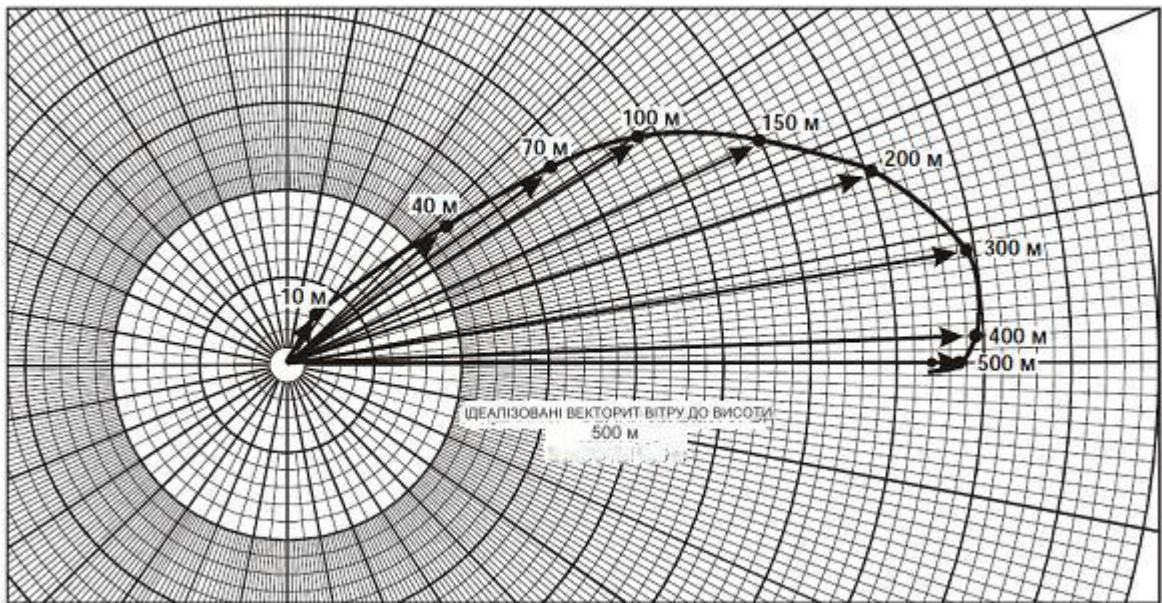


Рис. 1.3 Спіраль Екмана

Зазначені профілі вітру на аеродромах є більш ніж суто теоретичний інтерес у зв'язку зі зростаючим інтересом з боку служби управління повітряним рухом до використання інформації про детальну структуру вітру аж до висоти 600 метрів (2000 футів) для підвищення ефективності роботи аеродрому за рахунок більш чіткої оптимізації інтервалів між посадками повітряних суден. Дослідження показують, що посадка кількох додаткових повітряних суден на годину на аеродромах з обмеженою пропускнуною спроможністю може забезпечити дуже великі фінансові вигоди. Хоча сильного зсуву вітру виявлено не було (тобто зсув не конвективного профілю), зсуви вітру у більш високих шарах профілю вимагають від пілотів найуважливішого ставлення до швидкості заходу на посадку, щоб уникнути необґрунтованого відходу на друге коло з усіма витратами, що з цього випливають.

1.2 Обтікання перешкод вітром

Сильні приземні вітри, взаємодіючи з перешкодами на шляху переважаючого потоку, розташованими з навітряного боку траєкторії заходу

на посадку або вильоту, такими як великі будівлі, невисокі пагорби або тісно розташовані групи високих дерев, можуть створювати місцеві зсувні вітри. За таких обставин зсув вітру зазвичай супроводжується турбулентністю при ясном небі (ТЯН). Вплив перешкод на переважний потік повітря залежить від багатьох факторів, найважливішим з яких є швидкість вітру та його напрямок щодо перешкоди, а також масштаб перешкоди по відношенню до розмірів злітно-посадкової смуги.

Найчастіше зсув вітру подібного роду створюється великими будівлями поблизу злітно-посадкової смуги, особливо на невеликих аеродромах. Незважаючи на те, що висота будов обмежується в залежності від їх віддаленості від кромки льотної смуги, щоб вони не створювали перешкод для повітряних суден, для їх розмірів характерна досить значна ширина, і з різних причин вони групуються в тому самому районі. Це означає, що при порівняно невеликій висоті будов (наприклад, ангари, ємності для зберігання палива тощо) вони є широким і міцним бар'єром на шляху переважаючого приземного вітру. Потoki повітря обтікають будови збоку та зверху, що призводить до зміни значень вітру вздовж злітно-посадкової смуги (рисунок 1.4). Таке горизонтальне зрушення вітру, яке зазвичай носить місцевий характер і є пологим і турбулентним, створює особливі труднощі для легких повітряних суден, що роблять польоти на невеликих аеродромах, проте відзначалося його вплив і на більш важкі повітряні судна.

Для льотних полів іноді буквально вирубують ділянки великих лісів, внаслідок чого злітно-посадкова смуга виявляється фактично всередині тунелю з дерев. Якщо межа дерев знаходиться осторонь льотної смуги і вони не є перешкодою для повітряних суден, оскільки висота лісового або плантаційного пологу може досягати 30 метрів (100 футів), приземний вітер вздовж злітно-посадкової смуги часто майже не пов'язаний з напрямом переважаючого вітру над пологом. ліси. Найчастіше приземний вітер буває

слабким і змінним, або спостерігається повний штиль незалежно від параметрів переважаючого вітру (рисунок 1.4).

Загальний інтерес становлять злітно-посадкові смуги, які через необхідність були споруджені у вузьких долинах або вздовж гряди низьких пагорбів. У цьому випадку масштаб перешкоди такий, що воно може вплинути на повітряні потоки на малій висоті у великому районі. Там, де гряда низьких пагорбів простягається поруч із злітно-посадковою смугою, висота гряди може виявитися недостатньою для відхилення потоку, але при подоланні потоком пагорбів він набуває вертикальної (низхідної) складової, яка в залежності від близькості пагорбів до злітно-посадкової смуги може призводити до виникненню вздовж злітно-посадкової смуги місцевих низхідних потоків (рисунок 1.4). У тих випадках, коли пагорби або гори досить високі, щоб відхиляти вітер на малих висотах, приземний вітер може втягуватися по спіралі, що звужується, вздовж злітно-посадкової смуги (дивися рисунок 1.4).

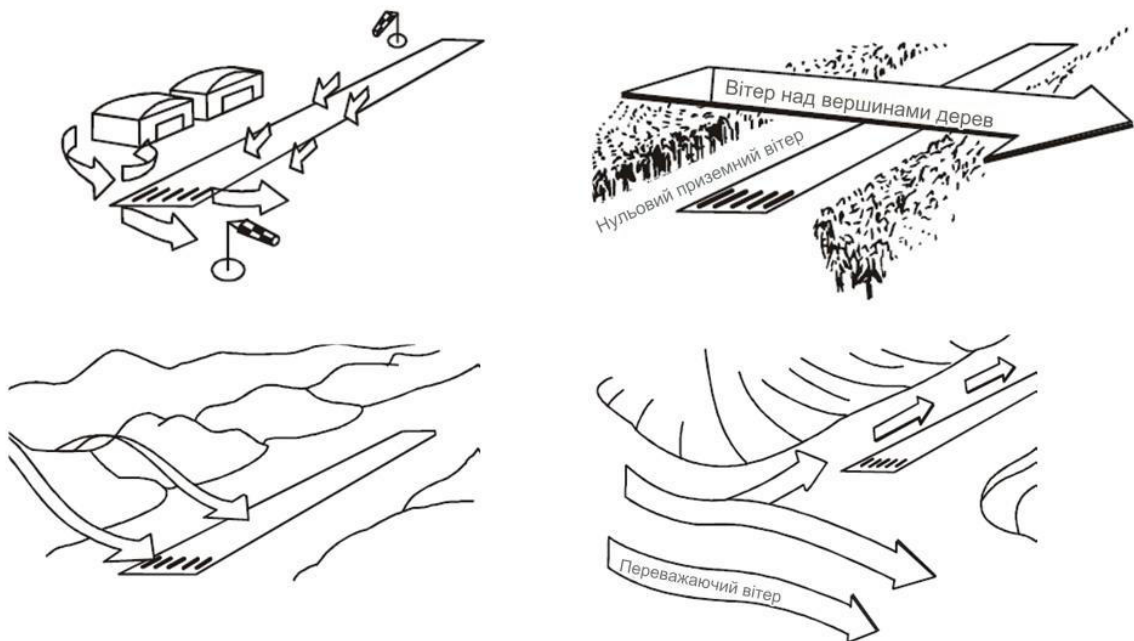


Рис.1.4 Різні варіанти обтікання перешкод вітром

У особливих випадках, коли пагорби розташовуються по обидва боки злітно-посадкової смуги, втягнутий по спіралі потік може виявляти

властивості, подібні до ефекту трубки Вентурі, що призводить до прискорення приземного вітру.

Сильні приземні вітри на аеродромах, де немає істотних перешкод на шляху повітряних потоків, також можуть призводити до зростання зсуву вітру. Це відбувається тому, що в найближчих до земної поверхні шарах атмосфери сильний вітер збільшує механічну турбулентність, яка в свою чергу передає момент кількості руху на всю область шару та зменшує зсув вітру біля землі, при цьому відповідно зростає зсув вітру на вищих рівнях поверхневого прикордонного шару.

Описаний вище зсув вітру відбувається через механічний вплив перешкод, з якими стикається переважний повітряний потік. У певних обставинах, окрім механічного впливу при обтіканні вітром перешкод, на потік можуть впливати і термодинамічні властивості атмосфери, створюючи цим особливі умови зсуву вітру.

Найбільш поширеним з таких умов є так званий катабатичний вітер, який дме в нічний час над похилою земною поверхнею без хмарності і при слабкому баричному градієнті, особливо при антициклоні. Вітер утворюється через стікає вниз по схилу гравітаційного потоку холоднішого і щільнішого повітря, який стикається зі схилом нижче теплого і менш щільного повітря, що знаходиться на тій же висоті, але на деякій відстані від поверхні схилу. Зсув вітру і турбулентність на малих висотах присутні вздовж передньої кромки і верхньої межі холоднішого повітря при його русі вниз по схилу пагорба, і іноді може відбуватися раптове прискорення, що нагадує фронт слабких поривів. Холодне, щільне повітря збирається як би в "калюжу" на дні долини, утворюючи температурну інверсію поблизу землі. Якщо поверхнева температурна інверсія досить сильна, панують над земною поверхнею вітри можуть ковзати над верхньою межею цієї стоячої калюжі холодного повітря, що залягає на дні долини. Це призводить до зсуву вітру на деякій висоті над рівнем землі вздовж верхньої межі інверсії.

Вплив проявляється у широкому діапазоні інтенсивності, від долинних або дренажних вітрів у найдрібнішому масштабі до фіордових вітрів у Норвегії, містера на півдні Франції, бори в Адріатиці та сильних вітрів континентального масштабу, що зароджуються у Гренландії та Антарктиді. Для утворення цих великомасштабних явищ зазвичай необхідні й інші фактори, крім катабатичного ефекту, такі, як дуже холодне повітря на височинах, оптимальна орієнтація ізобар і, як наслідок цього, переважаючий повітряний потік, а також, стосовно містраля, ефект Вентурі в долині Рони (Франція), який може сприяти збільшенню швидкості холодного північно-західного вітру зі схилів гір до 140 кілометрів на годину (70 вузлів) та більше.

Простий приклад потоку приземного вітру, що перетікає через гряди низьких пагорбів поблизу злітно-посадкової смуги аеродрому, згадується раніше. У більшому масштабі, коли повітряний потік перетікає через гірський хребет, залежно від швидкості та стійкості потоку повітря у ньому можуть створюватися стоячі хвилі з підвітряного боку гір. Окремі гірські хребти, такі, як Скелясті гори в Сполучених Штатах Америки, з унікальними властивостями (особливо з крутими схилами підвітряними) і сприятливими метеорологічними умовами відомі своїми яскраво вираженими підвітряними хвилями. Найбільш сприятливі метеорологічні умови для утворення підвітряних хвиль включають:

- стійкий шар повітря між двома менш стійкими шарами, один з яких розташований поблизу землі, а інший на більшій висоті;
- вітер, який має швидкість понад 30 кілометрів на годину (15 вузлів) під кутом у межах 30° з будь-якої сторони до лінії, що перетинає гребінь під прямим кутом;
- малий зсув напрямку вітру або відсутність цього зсуву у стійкому шарі;
- перепад тиску на рівні моря в місцевості, розділеній гірським хребтом.

Якщо підвітряні хвилі, що утворюються, мають досить велику амплітуду, під гребенем такої хвилі може формуватися замкнутий обертовий потік, або вихор. В екстремальних умовах такий потік, що обертається, може проникати до рівня землі і повертати назад приземний вітер безпосередньо під віссю обертання (рисунок 1.5). У таких екстремальних умовах відзначалися моменти, коли швидкість викликаних потоком приземних поривів, що обертається, перевищувала 200 кілометрів на годину (100 вузлів), наприклад під час “вітряних бур” недалеко від міста Боулдер, штат Колорадо. Чинники, необхідні освіти таких екстремальних умов, повною мірою ще зрозумілі, проте висловлювалася думка, що значної ролі тут може грати певна форма природного резонансу і посилення. При достатній вологості повітряного потоку у верхніх частинах замкнутого вихору формується вельми турбулентна "хмара, що обертається". Такі нерухомі хвильові системи створюють значні низхідні потоки вздовж краю гір, а також менш потужні низхідні потоки на досить значній відстані від гірських схилів у вторинних і третинних серіях хвиль, що утворюються на підвітряному боці гори.

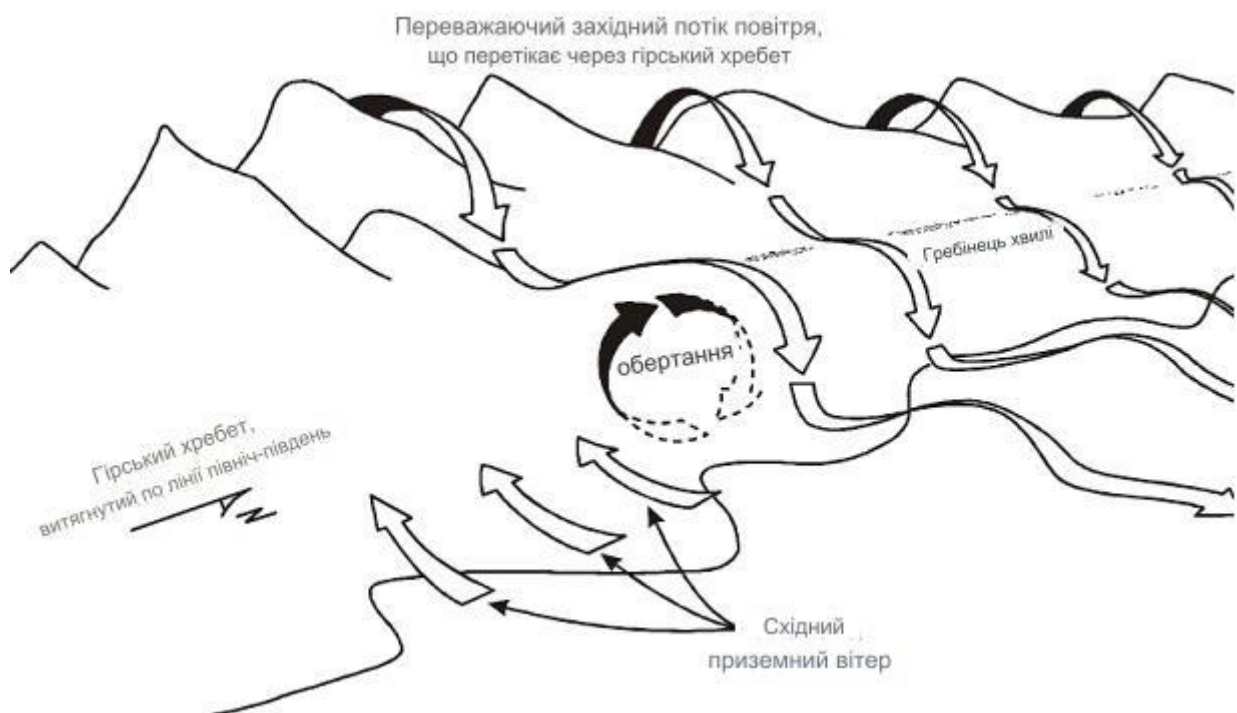


Рис. 1.5 Підвітряні хвилі

Іншим можливим наслідком перетікання повітряного потоку через гірський хребет є "фен" (наприклад, "Чінук" на заході Канади і "Санта-Ана" в Каліфорнії, Сполучені Штати Америки), що дме вниз по підвітряному схилу гір. У більшості випадків утворення такого вітру вниз по схилу пов'язане з тим, що повітряний потік, що нагнітається через гори, має достатню вологість і на навітряних схилах формуються хмарність і опади. У цих умовах повітря, що піднімається, охолоджується відповідно до градієнта насиченої адіабати, і якщо вода вивільняється у вигляді опадів на навітряних схилах, значна частка адіабатичного нагріву при русі повітря вниз по підвітряному схилу відбувається відповідно до градієнта сухої адіабати. Отже, повітря досягає підніжжя як помітно теплого, сухого вітру. Такий вітер – «фен» – може починатися зовсім раптово, викликаючи сильні рвучкі вітри на аеродромах, розташованих у його смузі. В умовах сильної температурної інверсії поблизу землі фен ковзає верхньою межею інверсії, створюючи зсув вітру вздовж зони інверсії на висоті від 100 до 500 метрів (330 - 1600 футів) над рівнем землі. Спостерігалися випадки, коли фен розвивався без утворення опадів на навітряних схилах гірського хребта. Вважається, що при цьому теплий, сухий вітер, що дме схилом, зароджується на висоті над гребенем гірського ланцюга, можливо, через утворення стоячої підвітряної хвилі.

1.3 Фронтальні поверхні

Фронтальні поверхні – це перехідні зони, що розмежовують повітряні маси з різною температурою і, отже, мають різну щільність. При зіткненні двох таких мас повітря рівновага встановлюється таким чином, що більш холодне і щільне повітря розташовується у формі клина нижче теплого і менш щільного повітря з невеликим кутом нахилу щодо горизонталі. Нахил фронтальної поверхні викликаний обертанням землі, але ступінь нахилу залежить також від контрасту в розподілі температур і вітру вздовж кордону

між двома повітряними масами: чим більше контраст, тим крутіше нахил. Динаміка фронтальних поверхонь обумовлює різку зміну швидкості вітру впоперек поверхні, особливо низьких шарах атмосфери; таким чином, фронтальна поверхня за своєю природою вже є зоною зсуву вітру.

Перетин фронтальної поверхні горизонтальною площиною означає положення фронтальної поверхні на конкретній висоті; перетин із поверхнею землі називають фронтом на поверхні землі або просто фронтом. Фронти класифікуються відповідно до їх руху і результируючими температурними змінами, що відбуваються в місцях проходження фронту, причому холодний (теплий) фронт визначається як фронт, уздовж якого на поверхні холодне (тепле) повітря заміщається теплішим (холоднішим) повітрям. Щодо сильні фронти із зонами різкого переходу і, відповідно, з різкими змінами швидкості вітру – це фронти, у яких вірогідніший зсув вітру, здатний впливати на повітряні судна. Середній ухил холодного фронту коливається від $1/50$ до $1/100$, але через тертя про земну поверхню холодне, щільне повітря поблизу землі запізнюється, а це може призвести до ще більш крутих нахилів у нижніх шарах атмосфери, включаючи утворення в певних умовах носа коли холодне повітря трохи вище земної поверхні випереджає холодне повітря на рівні землі. Теплі фронти більш пологі, їх типовий ухил становить від $1/100$ до $1/300$ і навіть менше до рівня землі. Вищезгадані типові нахили вказують на те, що, виключаючи дуже сильні холодні фронти поблизу землі, нахил навіть найбільшого фронту найчастіше буває пологішим, ніж звичайний кут нахилу глісади 3° , і набагато пологішим, ніж звичайні траєкторії початкового набору висоти.

З викладеного вище видно, що теплий фронт має передній нахил у напрямку свого руху, тоді як холодний фронт нахилений назад, тобто в напрямку, зворотному руху (рисунки 1.7).

Для аеродрому, через який проходять фронти, це означає, що вертикальне зсув вітру через фронтальну поверхню має місце:

а) над аеродромом попереду теплого фронту, причому рівень максимального зсуву вітру опускається рівня землі з наближенням фронту;

б) у холодному фронті та позаду нього, причому рівень максимального зсуву вітру піднімається над аеродромом від рівня землі слідом за проходженням холодного фронту.

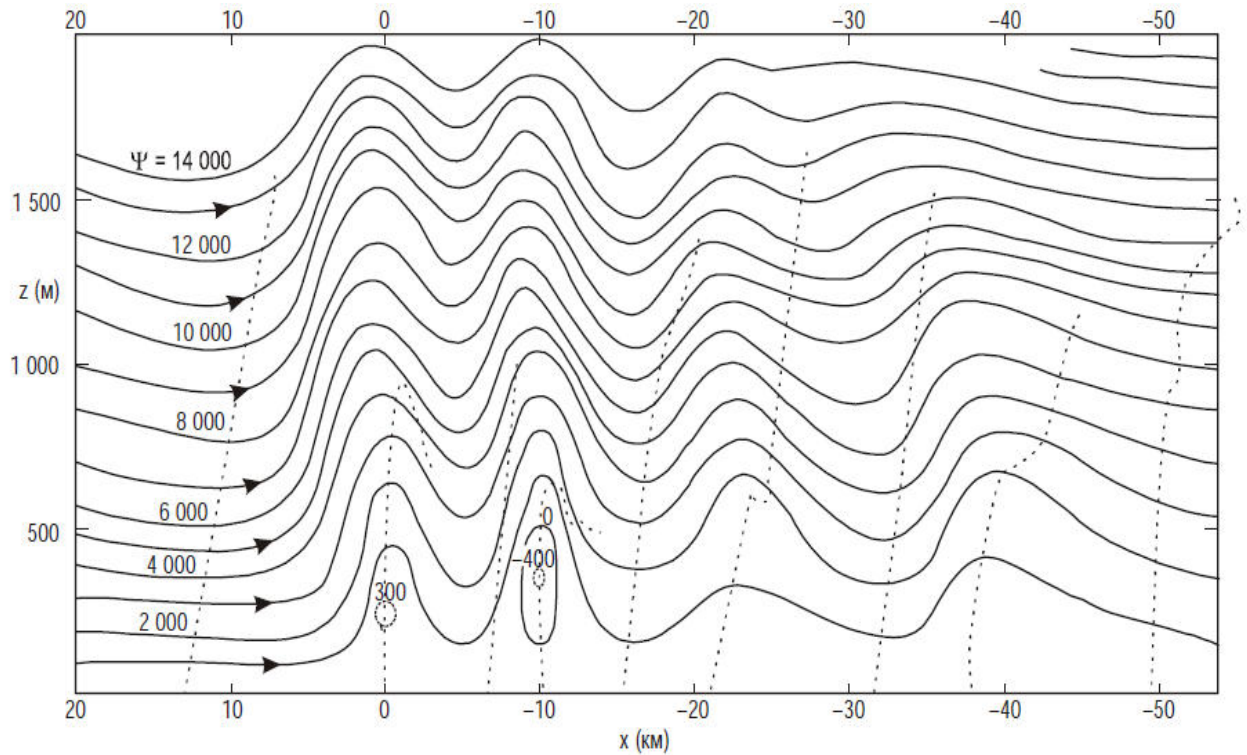


Рис. 1.6 Поперечний розріз відносних ліній обтікання



Рис. 1.7 Фронтальні поверхні

На рівні землі у напрямку поперек фронту спостерігається і горизонтальний зсув вітру, хоча за нормальної швидкості проходження фронтів через аеродром може бути скоротечне. Більш важливий з погляду авіації вертикальний зсув вітру поперек фронтальної поверхні над аеродромом, присутній попереду теплового фронту, що насувається, або позаду холодного фронту, що відходить.

Оскільки теплий фронт зазвичай переміщається повільніше, ніж холодний фронт, умови виникнення зсуву вітру, що існують попереду теплового фронту на землі можуть залишатися в межах аеродрому довше, ніж аналогічні умови, що існують позаду холодного фронту. Розглянутий у разі зсув вітру пов'язані з самої фронтальної поверхнею, а зсув вітру при грозах та інших., що може утворитися вздовж фронту, не береться до уваги. Вплив вертикального фронтального зсуву вітру на повітряне судно залежить від ширини фронтальної поверхні (перехідної зони) і часу, протягом якого повітряне судно пролітає через перехідну зону, а воно, у свою чергу, залежить від співвідношення кутів нахилу траєкторії польоту і фронтальної поверхні і від колії швидкості повітряного судна.

1.4 Вплив грозової діяльності

Гроза діяльність є одним із найбільш серйозних метеорологічних факторів, що впливають на безпеку польотів. Сильні висхідні та низхідні потоки повітря, град, блискавки та турбулентність усередині грозових хмар створюють екстремальні умови для експлуатації повітряних суден. Важливо відзначити, що незважаючи на всі заходи, що виникають, ризик виникнення небезпечних метеорологічних явищ під час польоту повністю виключити неможливо..

Коли атмосфера стає нестійкою з будь-якої причини, вона піддається конвективному перевертання. Поширеним прикладом можуть бути висхідні потоки нагрітого повітря, що виникають при нагріванні звернених до сонця

схилів. За сприятливих умов конвекція породжує області досить потужних місцевих висхідних потоків, у яких формуються купо-дощові хмари та грози. За традиційною класифікацією грози поділяються на такі два види відповідно до джерела нестійкості:

- а) грози у повітряній масі або теплові грози;
- б) передні грози.

Для гроз у повітряній масі або теплових гроз характерні різко виражені денні зміни, що відбуваються найчастіше після полудня та ввечері над сушею через сонячне нагрівання. Вони також трапляються з різним ступенем випадковості над ділянкою поверхні, де повітряна маса однорідна та умови однаково сприятливі. Однак, хоча нормою є випадковий розвиток, не так багато потрібно для отримання організаційного розвитку всередині однорідної повітряної маси. Таке явище може бути обумовлено орографічними висхідними потоками вздовж гірського хребта або підйомом уздовж лінії повітряних потоків, що сходяться, на малих висотах, наприклад, уздовж міжтропічної зони конвергенції або в спіральних смугах конвергенції, пов'язаних з тропічними циклонами. Фронтальні грози відбуваються головним чином у зв'язку з холодними фронтами та фронтальними депресіями, коли необхідне піднесення забезпечується конвергенцією на малих висотах і холодним прорізанням теплого повітря. Грози можуть також розвиватися при конвергенції на малих висотах вздовж фронтів морського бризу в полуденний годинник над сушею і вздовж фронтів, що віддаляються, берегового бризу в передсвітанний годинник над морем або над великими внутрішніми водоймами.

Структурний склад гроз зазвичай передбачає грон вогнищ, кожен з яких виступає як одиниця конвективної циркуляції, об'єднуючи як висхідні, так і низхідні потоки. У кожному осередку відбувається власний функціональний цикл, що займає період від 30 хвилин до 1 години. Ці функціональні цикли можуть відповідним чином поділятися на три стадії

залежно від напрямку та сили переважаючого вертикального потоку повітря в осередку (рисунок 1.8):

- а) купова стадія, що характеризується висхідними потоками по всьому осередку;
- б) стадія дозрівання, що характеризується наявністю як висхідних, і низхідних потоків;
- с) стадія розсіювання, що характеризується слабкими низхідними потоками по всьому осередку.

Розвиток вогнища в грозовому середовищі може відбуватися різними темпами - деякі вогнища можуть не завершити свій функціональний цикл, тоді як зростання інших вогнищ може прискоритися за рахунок перших. У тих випадках, коли два вогнища розвиваються в безпосередній близькості один від одного і один з них сильніший, часто спостерігається тенденція до злиття вогнищ.

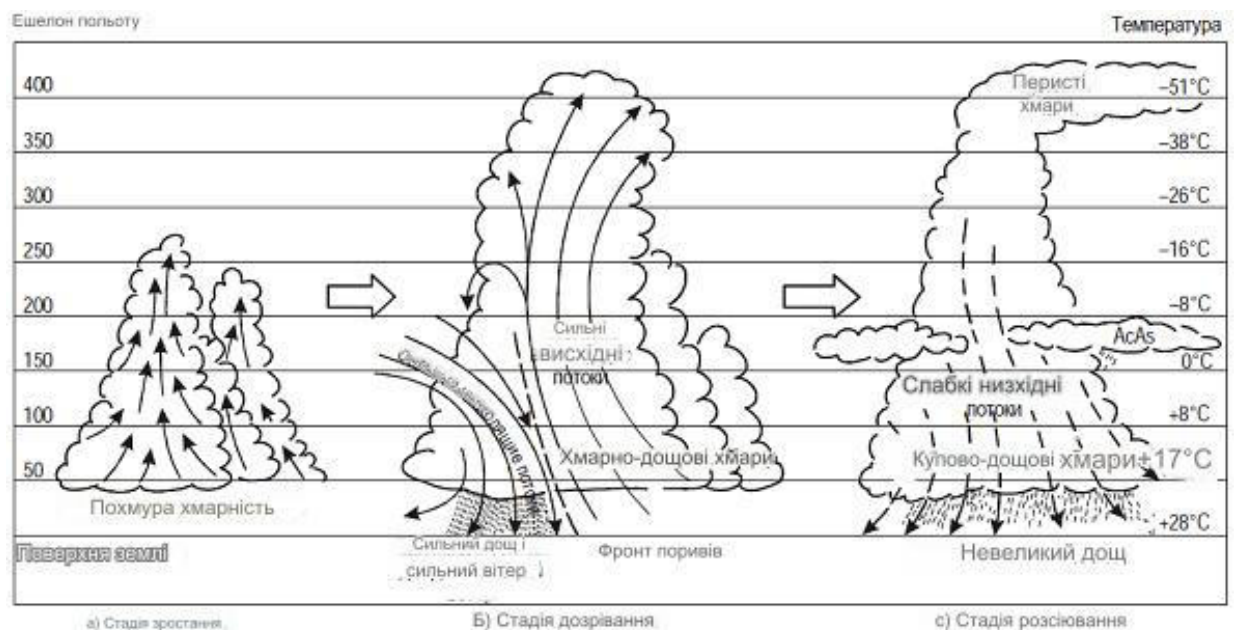


Рис. 1.8 Функціональний цикл грози

Області місцевих висхідних потоків повітря, від яких залежить початок розвитку грози, генеруються і підтримуються будь-яким або всіма джерелами, включаючи нагрівання земної поверхні, конвергенцію повітряних потоків на малих висотах і фронтальний або орографічний підйом

і т. д. Висота, що досягається висхідними потоками, Хмари залежать головним чином від стійкості атмосфери, її вологості та профілю атмосферного вітру.

У грозовому осередку, що розвивається, у міру підйому висхідних потоків вище нижньої межі хмарності крапельки води в хмарі збільшуються в результаті злиття і конденсації і починають замерзати, поки не стають настільки важкими, що падають назад крізь висхідний потік і ще більше важчають, захоплюючи нові водяні краплі вгору. Так зароджуються низхідні повітряні течії, які у цій стадії рухаються прискорено під впливом тяжіння. Однак у міру досягнення нижніх шарів до низхідних потоків приєднується більш сухе повітря, навколишнє хмара зовні, особливо з району висоти замерзання, що викликає випаровування крапель, що опускаються вниз, що швидко охолоджує навколишнє повітря і тим самим ще більше прискорює низхідний потік.

Ці водяні краплі в низхідному потоці, що не випарувалися повністю, випадають з нижньої кромки купово-дощової хмари у вигляді сильного місцевого дощу, що супроводжується сильним, рвучким вітром від течії холодного повітря. Східні повітряні потоки, які досить сильні, щоб проникнути за нижню кромку хмар, розтікаються горизонтально в усіх напрямках, трохи не доходячи до поверхні землі у вигляді холодного потоку, передня кромка якого нагадує пологий холодний фронт, який зазвичай називають "фронтом поривів". Землі, що досягають, низхідні потоки не завжди супроводжуються сильним дощем, хоча такі дощі зазвичай випадають. Навіть коли водяні краплі, що опускаються вниз, повністю випаровуються в хмарі або в повітрі трохи нижче нижньої межі хмарності у вигляді стовпів дощу, що звисають з хмар, пов'язаний з цим низхідний потік може все ж таки проникнути за нижній кордон хмарності і досягти рівня земної поверхні.

РОЗДІЛ 2

ЗСУВ ВІТРУ НА МАЛИХ ВИСОТАХ І ЙОГО ВПЛИВ НА ЛЬОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

2.1 Вітер та зміна його характеристик

Найпростішим визначенням вітру є рух повітря щодо земної поверхні. Вітер вільно дме в тривимірному просторі і, володіючи швидкістю та напрямком, повинен розглядатися як вектор, який можна розкласти на три ортогональні складові. Щодо земної поверхні це означає, що складові мають напрями: північ-південь, схід-захід та вгору-вниз. Якщо ж цей вектор береться щодо траєкторії польоту повітряного судна, це означає використання наступних напрямів складових: зустрічна/попутна (подовжні) складові вітру, бічні (поперечні) праворуч/ліворуч складові вітру та висхідна/низхідна (вертикальні) складові (рисунок 2.1).

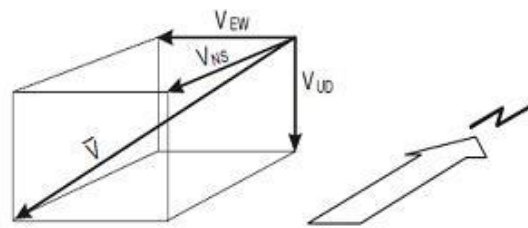
За винятком особливих випадків, вертикальна складова вітру в атмосфері зазвичай невелика в порівнянні з однією або обома горизонтальними складовими. Це особливо наочно проявляється поблизу земної поверхні, де вітер обмежений напрямом горизонтальній площині. Оскільки зазвичай переважають горизонтальні складові, передбачається, що горизонтальний вітер дме паралельно поверхні землі, ігноруючи таким чином вертикальну складову. Особливі випадки, коли переважає вертикальна складова, виникають за наявності конвективних хмар (особливо при грозах), гірських хвилях та висхідних потоках теплого повітря.

Оскільки повітряне судно зазвичай приземляється і злітає проти вітру, вибравши злітно-посадкову смугу з відповідним напрямом, зустрічна/супутня або подовжня складова вітру в переважній більшості випадків переважає бічний або поперечний складової. Цим пояснюється те що, що основний наголос зазвичай робиться зміни зустрічної/попутної (подовжньої) складової вітру, крім вже згадуваних особливих випадків, коли

переважає вертикальна складова (висхідний/низхідний потік). Крім того, при розрахунку зсуву вітру в аеропорту необхідно враховувати напрямок робочої злітно-посадкової смуги, що означає визначення всіх векторів зсуву щодо курсів робочої злітно-посадкової смуги і таким чином подання зсувів у вигляді зустрічних/попутних складових.

У наведеному раніше роз'ясненні зсуву вітру зміни швидкості і/або напрямку вітру, про які йдеться, стосуються змін середнього (або переважаючого) вітру на шляху від однієї опорної точки в просторі до іншої. Короточасні зміни вітру щодо середнього значення напрямку та/або швидкості зазвичай називають "відхиленнями" від переважаючого вітру. Такі відхилення вітру, принаймні взяті окремо, мають короточасний характер, на кшталт завихрень; хоча завихрення, безсумнівно, пов'язані зі зсувом вітру, оскільки вони за своїм масштабом менші за повітряне судно, їх вплив на повітряне судно проявляється лише у вигляді бовтанки, або турбулентності. Таким чином, масштаби впливу зсуву вітру щодо загальних розмірів конкретного повітряного судна відіграють важливу роль.

З вищевикладеного можна також зробити висновок, що, у той час як будь-яка турбулентність пов'язана зі зсувом вітру, нехай навіть у дуже малих масштабах, проте зсув вітру, особливо великомасштабний, не обов'язково включає турбулентність. Зсув вітру - це не просто одна з форм турбулентності при ясному небі; більше того, зсув вітру такого масштабу, який впливає на льотні характеристики повітряного судна, не обов'язково передбачає наявність турбулентності.



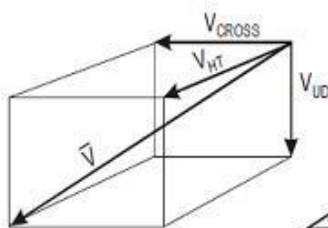
а) складові щодо земної системи координат

VEW - складова схід-захід

VNS - складова північ-південь

VUD - висхідна/низхідна (вертикальна) складова

V - фактичний тривимірний вектор вітру



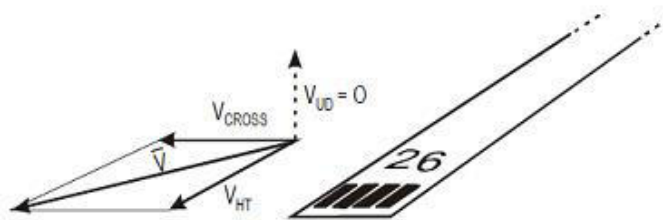
б) складові щодо спрямування ЗПС

VCROSS - бічна (поперечна) складова

HT - зустрічна / попутна (поздовжня) складова

VUD - висхідна/низхідна (вертикальна) складова

V - фактичний тривимірний вектор вітру



с) складові щодо спрямування ЗПС з нехтованим або нульовим значенням вертикальної складової

VCROSS - бічна (поперечна) складова

HT - зустрічна / попутна (поздовжня) складова

VUD - висхідна/низхідна (вертикальна) складова

V - двовірний вектор вітру

Рис. 2.1. Складові вітру в різних системах координат

2.2 Розрахунок зсуву вітру

Зсув вітру, що є зміною вектора вітру від однієї точки простору до іншої, виражається різницею між векторами вітру в двох точках, яка сама є

вектором (оскільки має як швидкість, так і напрямок). Інтенсивність зсуву розраховується шляхом розподілу величини різниці між векторами у двох точках на відстань між ними з використанням одних і тих самих одиниць виміру. Розрахунок зсуву може бути виконаний графічно з використанням трикутника швидкостей або віднімання складових двох векторів вітру вручну, за допомогою обчислювальної техніки або за допомогою тригонометричних методів.

Дія вектора різниці або вектора зсуву вітру у двох протилежних напрямках, залежно від напрямку зміни вітру, має важливе значення в плані його впливу на повітряне судно.

На рисунку 2.2 різниця векторів обчислюється відповідно до компонентів і стандартних формул. На практиці зазвичай заздалегідь розраховуються таблиці, де величина зсуву вітру визначається шляхом введення двох швидкостей вітру та кута між ними, і ці параметри подаються у вигляді складових уздовж напрямків робочої злітно-посадкової смуги (рисунок 2.2 с).

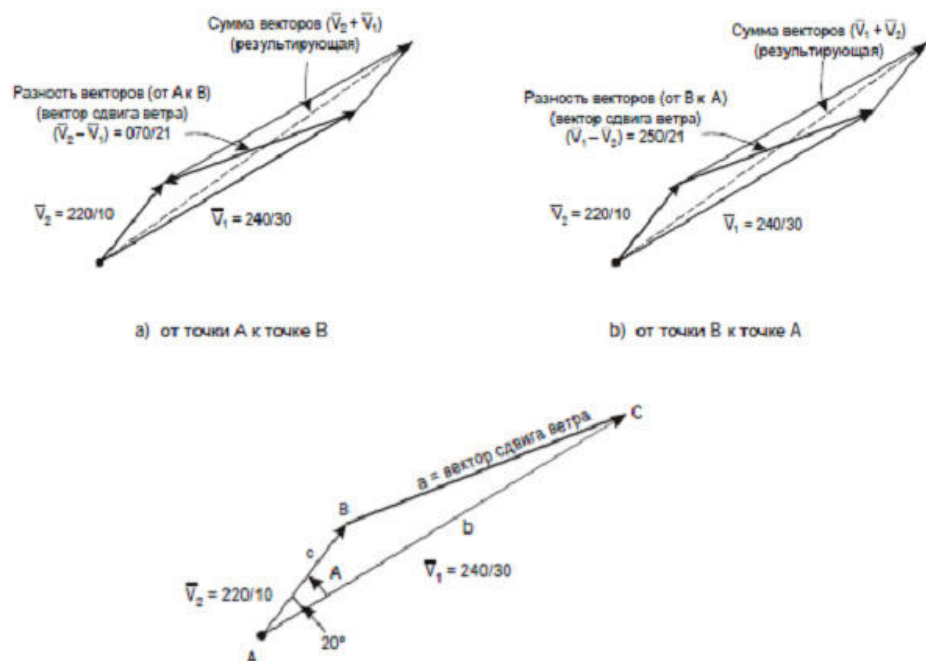


Рис. 2.2. Складові вітру в різних системах координат

Важко переоцінити те що, що зсув вітру – це вектор, і тому повинні братися до уваги як швидкість, і напрям вітру у двох повітряних потоках. Зсув вітру не можна розрахувати простим скалярним відніманням швидкостей вітру, крім особливих випадків, коли два конкретних напрями вітру точно збігаються чи протилежні.

Нарешті, слід зазначити, що значення скалярного зсуву (тобто результат безпосереднього віднімання швидкостей вітру без урахування векторів напрямку) завжди менше величини векторного зсуву або дорівнює їй; таким чином, цей підхід у більшості випадків призводить до заниження фактичної величини зсуву.

Для розуміння того впливу, який зсув вітру на льотні характеристики повітряного судна, корисно розглянути кілька основних принципів польоту. На рисунку 2.3 показані головні сили, які діють на повітряне судно в польоті. Це тяга, що забезпечується двигунами, вага повітряного судна, підйомна сила, що забезпечується головним чином площинами крила, та лобовий опір. Такі показники дещо спрощені; наприклад, передбачається, що сила тяги діє у точній відповідності до напрямку траєкторії польоту. Таке спрощення сприяє більшому розумінню приводів, не впливаючи на істоту висновків.

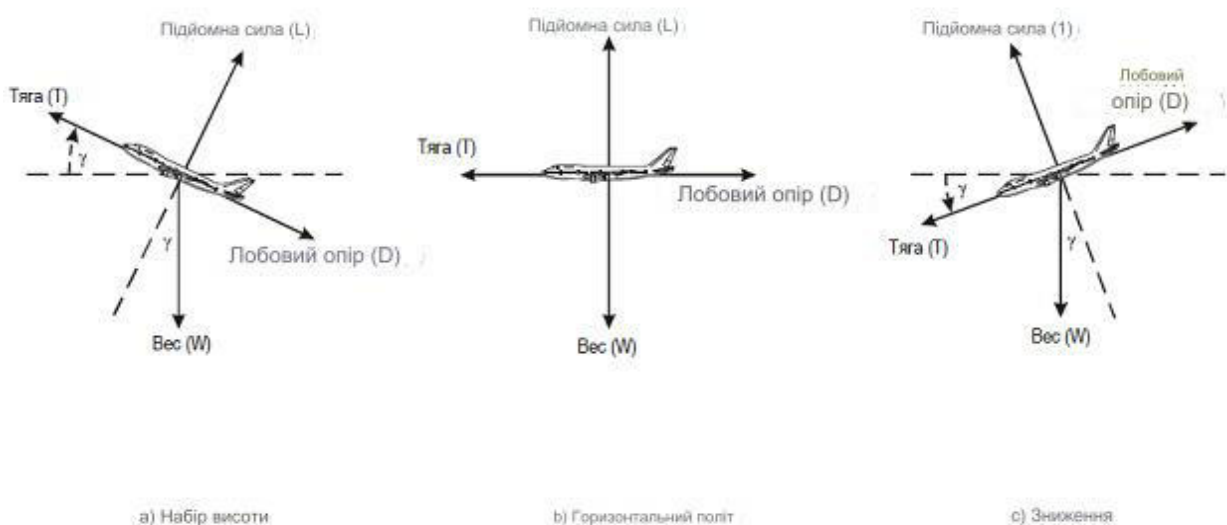


Рис. 2.3. Сили, що діють на повітряне судно у польоті

Коли сили, що діють на повітряне судно, взаємно врівноважені, у стійкому польоті без прискорення результуюча сила відсутня, і, отже, сума всіх сил, спрямованих вгору перпендикулярно до напрямку польоту, повинна бути рівною сумі всіх сил, спрямованих вниз перпендикулярно до напрямку польоту. Подібним чином сума всіх сил, що діють у напрямку польоту, повинна дорівнювати сумі всіх сил, що діють у протилежному напрямку. Повітряне судно в цьому випадку знаходиться в урівноваженому стані і, згідно з першим законом Ньютона, зберігатиме цей стан, будь то при наборі висоти, зниженні або горизонтальному польоті, доки рівновага сил не буде порушена.

Зробимо деякі висновки. У горизонтальному польоті без прискорення лобовий опір має врівноважуватись тягою, а вага – підйомною силою (рисунок 2.3b). У польоті з набором висоти без прискорення тяга повинна врівноважувати ще й частину ваги ($W \sin \gamma$), і, таким чином, при такому польоті потрібно більше тяги, ніж горизонтальному польоті, причому потрібна тяга прямо пропорційна куту набору висоти. Можливі кути набору висоти можна вивести шляхом спрощення формули (1) на рис. 2.3.

Для властивих набору висоти малих кутів $\sin \gamma \approx \gamma$ і формула набуває наступного вигляду:

$$T = D + W\gamma$$

і, отже,

$$\gamma = \frac{T - D}{W}.$$

Таким чином, кут набору висоти знаходиться у прямій залежності від величини переважання тяги над лобовим опором та у зворотній залежності від ваги. Що стосується польоту зі зниженням без прискорення (рисунок 2.3c)) з формули видно, що потрібна тяга менше, ніж у горизонтальному польоті, оскільки частина ваги ($W \sin \gamma$) в даному випадку діє так само, як і тяга.

2.3 Вплив зсуву вітру на повітряну швидкість

Твердження " вітер впливає повітряну швидкість " хіба що суперечить основному правилу початкової підготовки пілотів, який свідчить, що " вітер впливає лише на шляхову швидкість і знос " . Таке явне протиріччя, можливо, збентежило деяких пілотів і утруднило розуміння ними серйозності впливу, який зсув вітру може чинити на льотні характеристики повітряного судна. Протиріччя між цими двома твердженнями можна усунути, якщо ввести в першу фразу слово "короткочасний", щоб вона читалася: "вітер (тобто зміна вітру) надає короткочасний вплив на повітряну швидкість", і брати до уваги поздовжню стійкість повітряного судна, що забезпечує його прагнення відновити вихідну балансовану повітряну швидкість. Це означає, що в умовах стійкого вітру або в умовах поступової зміни горизонтального вітру він не впливає на повітряну швидкість і залишається справедливою добре відома формула:

$$GS = TAS \pm WIND$$

де:

GS	шляхова швидкість
TAS	дійсна (повітряна) швидкість
WIND	швидкість вітру

Однак, в умовах зсуву вітру горизонтальний вітер (у цій ситуації вітер вздовж лінії шляху є важливим фактором, як за наявності, наприклад, зустрічного або попутного вітру на посадці/зльоті), звичайно ж, нестійкий і змінюється не поступово, а може різко змінюватися на порівняно короткому відрізку шляху. Якщо повітряне судно потрапляє в такі умови зустрічного / попутного вітру, що швидко змінюється, ясно, що внаслідок дії сили інерції воно не може миттєво прискорити або сповільнити рух для відновлення вихідної повітряної швидкості, і протягом короткого, але певного періоду часу повітряна швидкість змінюється відповідно до зміни вітру. Така

"короткочасна" зміна повітряної швидкості призводить до зміни підйомної сили та лобового опору та порушує рівновагу сил, що діють на повітряне судно..

Порушення рівноваги сил, що діють на повітряне судно, призводить до появи результуючої сили, а застосування результуючої сили до повітряного судна негайно викликає прискорення. Це зумовлено другим законом Ньютона, який свідчить, що "швидкість зміни кількості руху тіла пропорційна силі, що діє на тіло, і спрямована в той же бік, що й прикладена сила".

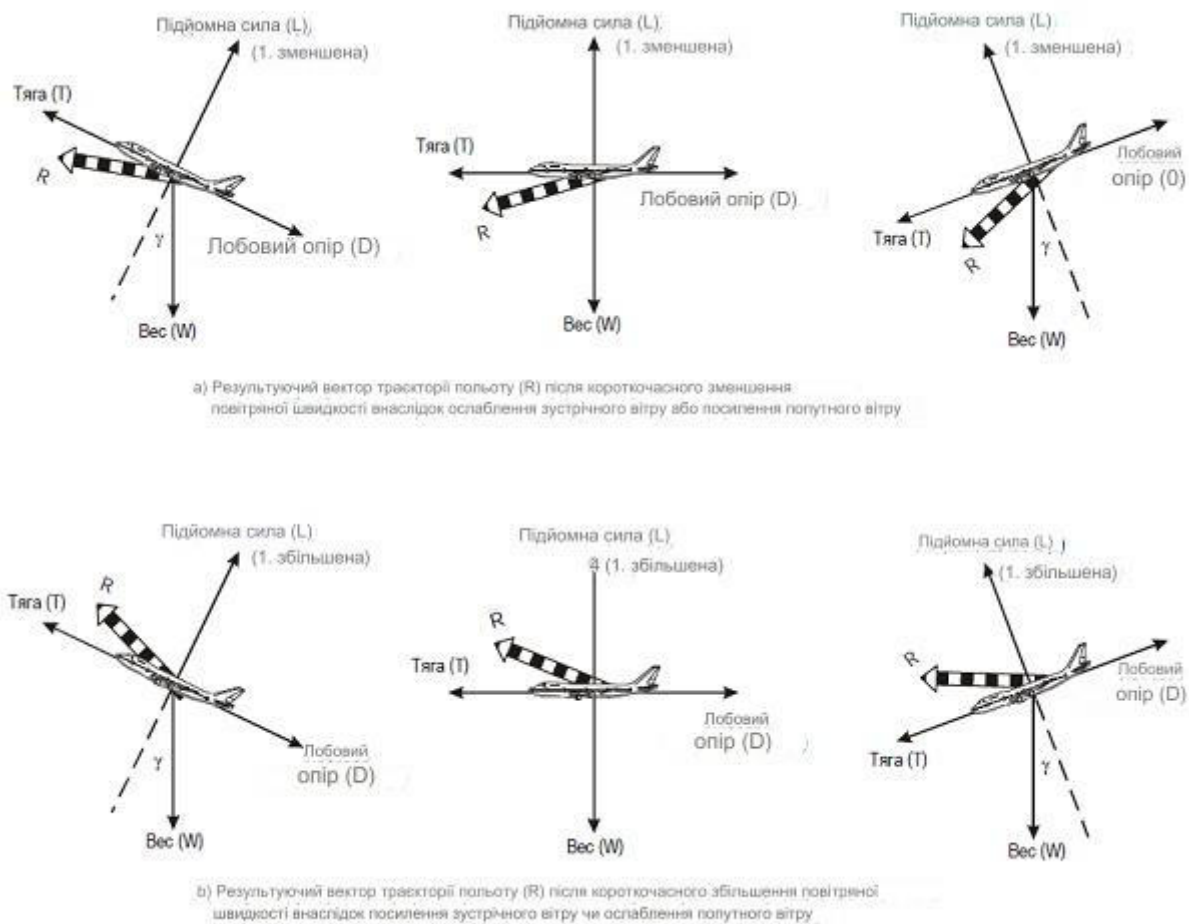


Рис. 2.4. Результуючий вектор траєкторії польоту, пов'язаний зі зсувом горизонтального вітру

Повітряне судно рухається з прискоренням у тому напрямку, в якому діє порушуюча рівновагу (результуюча) сила, доки не буде знову досягнуто рівноваги сил. Виділений текст підкреслює, що при відновленні рівноваги

повітряне судно неминуче слідує за новою траєкторією польоту і, відповідно до першого закону Ньютона, залишатиметься на новій траєкторії польоту доти, доки рівновага не буде знову порушена.

Повітряне судно завжди прагне зайняти таку траєкторію польоту, на якій буде досягнуто рівноваги між силами, що діють на нього. Іншими словами, зсув вітру змінює траєкторію польоту повітряного судна, і для того, щоб повітряне судно повернулося на задану траєкторію польоту, потрібно втручання пілота. Початкові зміни траєкторії польоту через короточасні зміни повітряної швидкості, що викликаються зсувом вітру, показані на рисунку 2.4. Ця дія викликається зсувом горизонтального вітру, що може спостерігатися в профілях сильного вітру поблизу землі (особливо у струменевих течіях на малих висотах), фронтальних системах і так далі.

До цих пір розгляд питань зсуву вітру обмежувався складовими зустрічного/супутнього вітру та впливом зсуву вітру на повітряну швидкість, а також вертикальними складовими вітру (висхідні/низхідні потоки) та впливом зсуву вітру на кут атаки. Як згадувалося раніше, оскільки злітно-посадкові смуги орієнтовані так, щоб, по можливості, їх напрямок забезпечувало найменшу бічну складову вітру, питання зсуву у складових зустрічного/попутного вітру та особливих випадків зсуву у вертикальних складових вітру (наприклад, при низхідних поривах) є переважають під час розгляду зсуву вітру. Це не означає, що зсуву в бічній складовій вітру не існує або що подібний зсув не впливає на повітряне судно. Фактично деяке зрушення у складовій бічного вітру має місце майже завжди, але це, взагалі кажучи, не впливає на повітряну швидкість і кут атаки і, отже, не змінює стану рівноваги сил, що діють на повітряне судно у вертикальній площині..

2.4 Вплив зсуву вітру на зліт та посадку повітряного судна

Зсув вітру (wind shear - WS) – зміна швидкості та/або напрямки вітру у просторі. Період зосередження вітру дорівнює 2 хв. Вважається, що зміна

вітру, що характеризує зсув вітру, повинна, по-перше, тривати кілька секунд або більше і, по-друге, вона повинна спричинити зміну підйомної сили повітряного судна. Зсув вітру є невидимим та раптовим явищем. Розрізняють вертикальні та горизонтальні зрушення вітру. Вертикальне зсув вітру – зміна вітру з висотою по вертикалі на 30 метрів. Горизонтальний зсув вітру – зміна вітру горизонталлю на 600 метрів.

Зсув вітру та атмосферна турбулентність – різні, але пов'язані один з одним явища. На відміну від зсуву вітру, турбулентність зазвичай призводить до поштовхів та ударів і не спричиняє значного відхилення повітряного судна від глісади зниження.

Однак у разі сильної турбулентності може відбутися різка зміна висоти та положення повітряного судна у просторі, і пілот може миттєво втратити контроль над керуванням повітряного судна.

Проблема зсуву вітру виникла у зв'язку з появою повітряних суден з великою масою і тому, що мають велику інерцію, через яку колійна швидкість не може миттєво змінитися при раптовій зміні вітру вздовж траєкторії польоту. За зміни вітру і сталості колійної швидкості протягом короткого проміжку часу відбувається зміна повітряної швидкості, так як вектор дорожній швидкості дорівнює сумі векторів вітру та повітряної швидкості. При збільшенні повітряної швидкості, а значить і підйомної сили крила, відбувається підйом повітряного судна, а при зменшенні – опускання повітряного судна щодо розрахункової траєкторії польоту. При заході на посадку і при зльоті значні відхилення повітряного судна від траєкторії польоту становлять велику небезпеку через близькість землі і дефіцит часу. Критерії інтенсивності зсуву вітру та впливу його на управління повітряних суден розроблено Міжнародною організацією цивільної авіації (таблиця 2.1).

Найбільш сильні вертикальні зсуви вітру відзначаються у приземному шарі на висотах до 100 метрів від землі. Якщо швидкість зустрічного вітру в цьому шарі з висотою різко збільшується, то при посадці повітряне судно

опускається нижче глісади, а при зльоті піднімається вище за розрахункову траєкторію.

Таблиця 2.1

Критерії інтенсивності зсуву вітру

Інтенсивність зсуву вітру	Вплив зсуву вітру на управління ПС	Градація, м/с горизонтальний зсув вітру на 600 м вертикальний зсув вітру на 30 м
Слабкий	Незначне	0,1-2,0
Помірний	Значне	2,1-4,0
Сильний	Істотне	4,1-6,0
Дуже сильний	Небезпечне	> 6,0

Це може призвести відповідно до посадки до злітно-посадкової смуги та звалювання повітряного судна. Якщо швидкість зустрічного вітру з висотою зменшується, то при посадці повітряне судно піднімається вище за глісаду, внаслідок чого може відбутися викочування повітряного судна за межі злітно-посадкової смуги. При зльоті в цих умовах повітряне судно опускається нижче за розрахункову траєкторію, що може стати причиною зіткнення повітряного судна з перешкодами поблизу аеродрому. Найбільш небезпечним для польотів вважається зсув вітру, що призводить до втрати висоти.

Вплив горизонтального зсуву вітру на політ повітряного судна виявляється у «підкиданні» (тобто різкому неконтрольованому збільшенні висоти польоту повітряного судна) повітряного судна зі збільшенням швидкості зустрічного вітру у бік польоту чи «провалюванні» (тобто різкому неконтрольованому зменшенні висоти польоту повітря) повітряного судна зі збільшенням швидкості попутного вітру. Бічні зрушення вітру обумовлені різкою зміною напрямку вітру з висотою і призводять до бічних зсувів повітряного судна від розрахункової траєкторії польоту.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ЗСУВУ ВІТРУ ДЛЯ МОДЕЛЮЮЧОГО КОМПЛЕКСУ РОБОТИ АВІАДИСПЕТЧЕРА

Хоча зсув вітру не є новим явищем у метеорології і, зрозуміло, не є єдиною метеорологічною небезпекою для авіації, існують принаймні дві причини, чому зсуву вітру приділяється стільки уваги. По-перше, останніми роками спостерігається підвищення рівня усвідомлення його небезпечного впливу на льотні характеристики повітряних суден в умовах дедалі більшого числа важких реактивних транспортних повітряних суден та цілої серії авіаційних подій у 1970–1980-х роках, які забрали людські життя. По-друге, в авіаційних колах все ще зберігається плутанина і нерозуміння щодо причин зсуву вітру, того, що він є і до чого він може привести. Частково це можна пояснити безперечною складністю питання та навколишнього його невизначеністю, а частково короткостроковим характером зсуву вітру. Безсумнівно, успішна розробка у 1990-х роках ефективних наземних та бортових систем попередження про зсув вітру схилила шальки терезів у бік пілота. Однак водночас жодна система не дає стовідсоткової гарантії, і крім того, лише деякі держави можуть дозволити собі встановлення та технічне обслуговування такого складного наземного обладнання для попередження про зсув вітру, як система TDWR. Яке б не було обладнання для попередження про зсув вітру, відновлення нормального положення при зустрічі з дуже сильним зсувом вітру завжди вимагає швидкої реакції та вміння з боку пілота. Головна проблема, що все ще стоїть перед пілотами та метеорологами, пов'язана з точним передбаченням появи зсуву вітру на малих висотах. Відсутність такої точності призводить до того, що навіть якщо зсув вітру передбачений і має місце в будь-якій зоні, повітряне судно, що летить у цій зоні, може не зустрітися з ним через локалізований і нестійкий характер його впливу. У цьому одна з причин того, що повідомлення про зустріч зі зсувом вітру відіграють важливу роль. Єдиним

способом протистояти плутанині та хибним уявленням та забезпечити пілоту основу для прийняття правильних рішень та швидкої реакції при несподіваній зустрічі зі зсувом вітру є відповідна навчальна підготовка.

Необхідність розробки навчальної програми не можна переоцінити у світлі забезпечення того, щоб усі, хто причетний до експлуатації повітряних суден, були повідомлені про небезпечні, потенційно згубні наслідки зсуву вітру на малих висотах. Програма для льотних екіпажів повинна починатися з раннього етапу їх навчання і продовжуватись на всьому протязі їхньої професійної кар'єри. Слід забезпечити проведення перепідготовки, яка повинна бути зосереджена на підвищенні рівня засвоєння способів, що дозволяють розпізнавати це явище, уникати зустрічі з ним і протистояти йому, особливо з урахуванням результатів технічних розробок, що безперервно ведуться. Вимоги щодо навчання стосуються як пілотів, і бортінженерів. Крім того, співробітникам із забезпечення польотів (польотні диспетчери) та диспетчерам управління повітряним рухом, а також їх помічникам необхідно пройти підготовку з питань, пов'язаних із з'ясуванням небезпечного характеру цього явища та його розпізнавання.

3.1 Підготовка персоналу служби управління повітряним рухом

Диспетчер управління повітряним рухом, як правило, є виключно важливою сполучною ланкою між метеорологом і пілотом і між самими пілотами щодо повідомлень про зсув вітру. Це зумовлює створення програми підготовки всім диспетчерів. Головну увагу слід приділяти тим диспетчерам, які забезпечують управління рухом на аеродромі та в зоні підходу, оскільки найбільш критичними етапами польоту з погляду зустрічі зі зсувом вітру на малих висотах є зліт, захід на посадку та посадку.

У розробці відповідної навчальної програми підготовки диспетчерів управління повітряним рухом може надати допомогу Посібник з навчання, частина F-1 "Метеорологічне забезпечення диспетчерів повітряного руху та

пілотів", опубліковане в Документі 7192 Міжнародної організації цивільної авіації. Зокрема, підрозділ 3.4 цього документа ("Зв'язок між вітром та тиском") потребує знання визначення зсуву вітру. Крім того, відповідно до пункту 3.10.2 необхідно вивчити зсув вітру, пов'язаний з грозами (включаючи фронти поривів, а також сухі та вологі мікропориви), та вплив цих явищ на польоти повітряних суден. Рекомендований рівень необхідних знань характеризується як "... знання предмета та здатність застосовувати у відповідних випадках це знання на практиці за допомогою довідкових матеріалів та інструкцій".

Наземна підготовка для первісного отримання свідоцтва пілота-аматора і пілота комерційної авіації повинна мати на меті ознайомлення з небезпечними проявами зсуву вітру.

У Посібнику з навчання, частина F-1 "Метеорологічне забезпечення диспетчерів повітряного руху та пілотів" Міжнародної організації цивільної авіації містяться докладні відомості про підготовку з питань зсуву вітру для отримання свідоцтва пілота комерційної авіації. Відповідні витримки наведено у додаванні 9 до цього посібника. У 1987 році ФАУ випустила відмінний навчальний посібник із зсуву вітру, в якому наводиться докладне роз'яснення впливу зсуву вітру на польоти повітряних суден та містить значний обсяг допоміжних матеріалів.

Розміри та маса повітряного судна є важливими факторами щодо ступеня впливу зсуву вітру на льотні характеристики конкретного типу повітряного судна. Отже, особливу увагу необхідно приділяти навчанню на важких повітряних суднах, отримання права управління якими пілотам потрібна кваліфікаційна відмітка типу. Таким чином, крім розширеної підготовки щодо перших двох цілей, наземна підготовка, що забезпечується експлуатантом для льотного екіпажу на повітряному судні конкретного типу, повинна передбачати ознайомлення зі специфічними характеристиками повітряного судна цього типу, включаючи докладне ознайомлення з будь-яким бортовим обладнанням для виявлення зсуву вітру. Ця підготовка

повинна проводитися з урахуванням кліматології географічної зони, куди літатиме екіпаж, особливо якщо для таких районів характерний підвищений ризик зустрічі зі зсувом вітру. Слід особливо наголосити, що:

- а) для запобігання катастрофі треба запобігати зустрічам зі зсувом вітру;
- б) розпізнавання фактичної зустрічі зі зсувом вітру в польоті може відбутися на дуже пізньому етапі, щоб пілот міг вжити будь-яких дій;
- с) якщо є спеціальне бортове приладове обладнання, надзвичайно важливо вживати відповідних дій негайно після отримання попередження, дотримуючись передбачених інструктивних вказівок та правил, розроблених експлуатантом.

Необхідно наголосити, що таку наземну підготовку мають проходити всі пілоти, які претендують на отримання кваліфікаційної позначки, що дає право на пілотування важких повітряних суден, незалежно від категорії свідоцтва пілота, власниками якого вони є.

Цілями програми підготовки диспетчерів управління повітряним рухом з питань, що стосуються зсуву вітру, мають бути такі:

- а) домогтися розуміння зсуву вітру та можливих його впливів на льотні характеристики повітряного судна;
- б) надати допомогу в набутті вміння визначати умови, в яких може відбуватися зсув вітру;
- с) ознайомити з правилами передачі повідомлень про зсув вітру та відпрацювати застосування цих правил на практиці.

Підпункти а) та б) охоплюють переважно ту саму область, яка включена до програми наземної підготовки льотних екіпажів. В силу цього наявні матеріали для підготовки льотних екіпажів можуть використовуватись і з метою підготовки диспетчерів. Крім того, було б корисно надавати іноді диспетчеру управління повітряним рухом можливість бути спостерігачем при навчальних вправах членів льотного екіпажу на пілотажному тренажері, коли відпрацьовується порядок дій в умовах зсуву вітру.

Далі ми розглянемо рекомендації екіпажам повітряних суден та органам управління повітряним рухом щодо забезпечення безпеки зльотів та посадок повітряних суден в умовах зсуву вітру. Необхідно пам'ятати, що зліт та захід на посадку в умовах сильного зсуву вітру забороняються. Попадання повітряних суден у ці умови відноситься до особливих випадків у польоті. Екіпажі повітряних суден повинні знати, що при зльоті та заході на посадку в умовах зсуву вітру необхідно: збільшити розрахункові швидкості відповідно до вимог керівництва з льотної експлуатації повітряного судна, здійснювати підвищений контроль над зміною поступальної та вертикальної швидкостей та негайно парувати відхилення від розрахункових параметрів, що виникають, та заданої траєкторії польоту.

При заході на посадку потрібно негайно піти на друге коло з використанням злітного режиму і слідувати на запасний аеродром, якщо для витримання заданої глибини зниження потрібно збільшити режим роботи двигунів до номінального та/або після прольоту далекого приводного радіомаркера вертикальна швидкість зниження збільшилася на 3 метри в секунду та більше від розрахункової.

Диспетчери управління повітряним рухом повинні якісно оцінювати метеорологічну обстановку на аеродромі та своєчасно доводити до екіпажів повітряних суден інформацію про наявність та/або прогнозування зсуву вітру на аеродромі. Диспетчери мають бути готові рекомендувати запасний аеродром..

3.2 Удосконалення моделі польоту повітряного судна для моделюючого комплексу

У процесі вивчення моделі польоту повітряного судна, що застосовується в моделювальному комплексі роботи авіадиспетчера, було виявлено серйозну ваду, яка не дозволяє реалізувати достовірну модель

польоту в нижньому повітряному просторі і, що особливо важливо для нашого завдання, на фінальному етапі заходу на посадку.

Щоб зрозуміти нестачу існуючої моделі, розглянемо її докладніше. На наведеному нижче фрагменті вихідного коду програми, виконаного мовою Object Pascal у середовищі програмування Borland Delphi, показано структуру об'єкта TVSType, що відповідає за характеристики польоту повітряного судна:

1. FSpeedTakeOff: double; // Швидкість зльоту (метри в секунду)
2. FSpeedLanding: double; // Швидкість посадки (метри в секунду)
3. FSpeedCruise: double; // Крейсерська швидкість (метри в секунду)
4. FSpeedMin: double; // Мінімальна дорожня швидкість (метри в секунду)
5. FSpeedMax: double; // Максимальна дорожня швидкість (метри в секунду)
6. FSpeedUp: double; // Верт.швидкість набору (метри в секунду)
7. FSpeedDown: double; // Верт.швидкість зниження (метри в секунду)
8. FSpeedTurn: double; // Кутова швидкість розвороту (градуси за секунду)
9. FFlightHeightMax: integer; // Макс висота польоту (метри)
- 10.FMassaVS: integer; // Маса (кілограми)
- 11.FFuelWasteCircle: double; // витрата на колі (кілограми в секунду)
- 12.FFuelWasteCruise: double; // витрата на крейсерській швидкості (кілограми в секунду)
- 13.FFuelWasteMax: double; // витрата на максимальній швидкості (кілограми в секунду)
- 14.FFuelMax: integer; // макс запас палива (кілограми)
- 15.FVSName: string; // назва типу повітряного судна

Для нас найбільший інтерес мають пункти з 1 по 7, які відповідають за швидкісні характеристики польоту. Як видно з наведеного лістингу, у

існуючій моделі відсутній поділ характеристик за висотами/етапами польоту. Це викликано насамперед тим, що спочатку робоче місце диспетчера радіолокаційного контролю розроблялося для секторів районного диспетчерського центру (СТА). На сьогодні обмеженість моделі не дозволяє моделювати сектори обслуговування підходу (ТМА), на що неодноразово вказував розробник комплексу, що моделює.

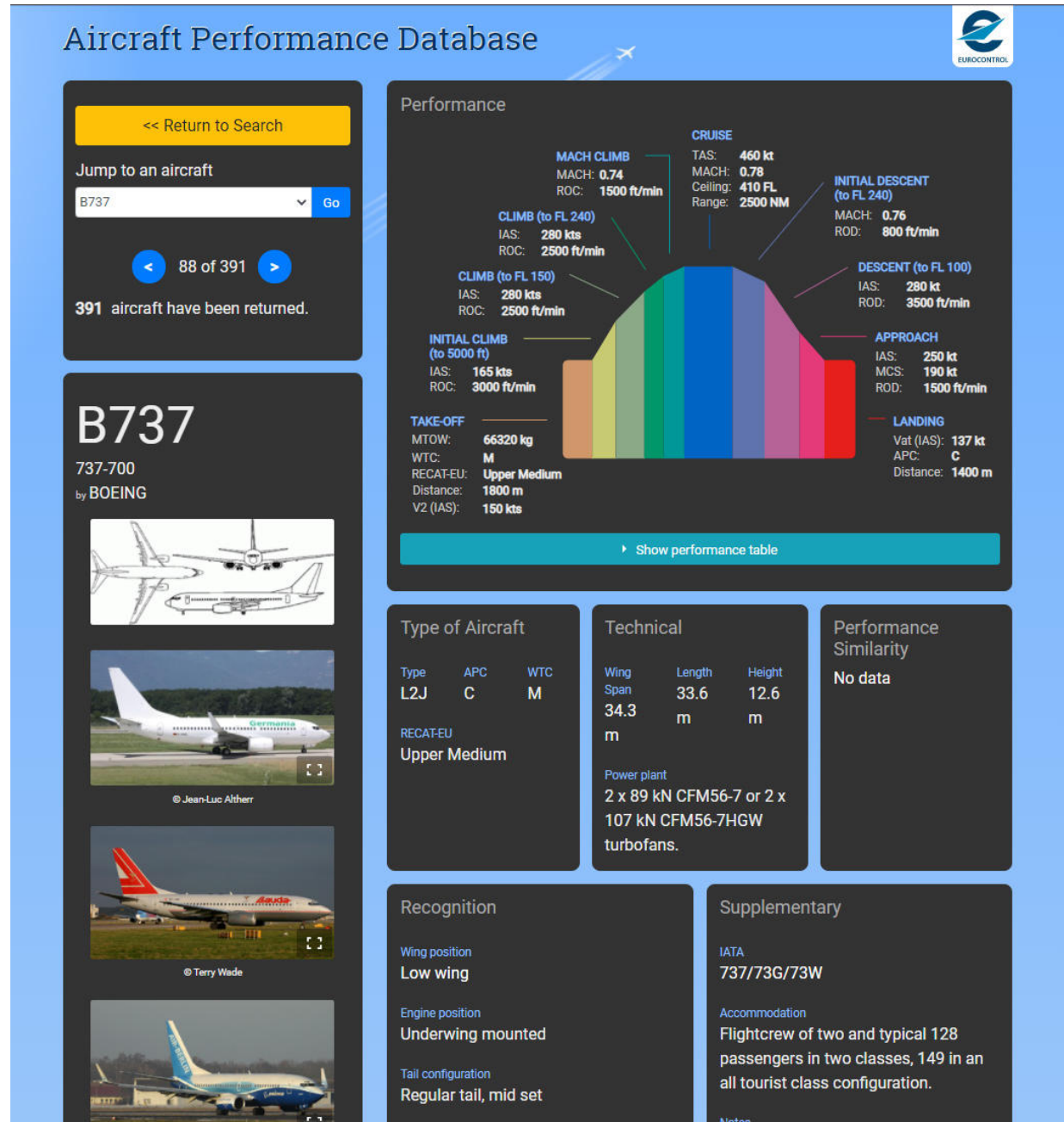


Рис.3.1 Інтернет-сторінка сайту Aircraft Performance Database.

Для усунення цього обмеження пропонується розширити існуючу модель. Як зразок ми збираємося використовувати модель даних про польотні характеристики повітряних суден, взяту нами з бази даних характеристик повітряних суден, що розробляється Євроконтролем і Aircraft Performance Database. Зовнішній вигляд візуального представлення даних на прикладі повітряного судна Boeing B737 показано на рисунку 3.1. На підставі графіка горизонтальної та вертикальної швидкостей для кожного етапу польоту можна побудувати досить докладну модель, яка дозволить моделювати політ повітряних суден із прийнятною точністю. Поновлена модель швидкісних характеристик повітряних суден, побудована нами, має наступну структуру:

1. ID	INTEGER NOT NULL,
2. MODEL	VARCHAR(20),
3. BRAND	VARCHAR(100),
4. FULLNAME	VARCHAR(20),
5. WTS	VARCHAR(10),
6. MTOW	INTEGER,
7. MAXALT	INTEGER,
8. V0	INTEGER,
9. V1	INTEGER,
10. V2	INTEGER,
11. VMIN	INTEGER,
12. ROC0	INTEGER,
13. ROC1	INTEGER,
14. ROC2	INTEGER,
15. ROD0	INTEGER,
16. ROD1	INTEGER,
17. ROD2	INTEGER,
18. VSTYPEINFO	BLOB SUB_TYPE 0 SEGMENT SIZE 80,
19. INFOTXT	BLOB SUB_TYPE 1 SEGMENT SIZE 80,
20. SMALLPIC	BLOB SUB_TYPE 0 SEGMENT SIZE 80

На рисунку 3.2 показана база даних, відкрита у програмі IBEExpert, у якій була створена нами для побудови нашої моделі. Як систему управління

базами даних ми використовували вільно-поширюваний варіант системи управління базами даних FireBird, яка розробляється авторами відомої системи управління базами даних InterBase.

ID	MODEL	BRAND	VSTYPEINFO	FULLNAME	WTS	MTOW	MAXALT	V0	V1	V2	ROC0	ROC1	ROC2	ROD0	ROD1	ROD2	VMIN	INFOTXT	SMALLPI
20	E190	EMBRAER		Embraer 190	M	45 995	12 600	190	300	460	3 400	2 800	1 800	1 600	2 200	2 100	138	<null>	
21	T204	TUPOLEV		Tu-204	M	103 000	11 800	180	290	450	3 500	2 200	1 000	1 500	3 500	800	160	IATA: T20	
22	A340	AIRBUS		A340-200	H	275 000	12 600	175	290	490	1 500	1 000	700	1 500	2 000	1 000	150	IATA: 340 /	
23	A319	AIRBUS		A319	M	64 000	12 000	165	290	450	2 500	1 500	1 000	1 500	3 500	1 000	135	<null>	
24	B733	BOEING		B737-300	M	56 470	11 600	165	270	429	2 500	2 000	1 000	1 500	3 500	800	140	IATA:	
25	B734	BOEING		B737-400	M	62 820	11 600	175	270	430	3 000	2 000	1 000	1 500	3 500	1 500	150	IATA: 734	
26	B735	BOEING		B737-500	M	52 390	11 600	165	270	430	3 000	1 800	1 000	1 500	3 500	1 000	139	IATA: 735	
27	B738	BOEING		B737-800	M	70 530	12 600	165	290	460	3 000	2 000	1 500	1 500	3 500	800	145	IATA:	
28	B744	BOEING		B747-400	H	396 890	13 900	215	300	510	1 500	1 500	1 500	1 500	3 000	1 000	185	IATA:	
29	B752	BOEING		B757-200	M	115 680	12 900	175	300	470	3 500	2 000	1 500	1 500	3 500	1 000	145	IATA:	
30	B77W	BOEING		B777-300ER	H	351 500	13 200	200	300	490	3 000	2 000	1 500	1 500	3 000	1 000	168	IATA:	
31	E145	EMBRAER		EMB-145	M	21 198	10 500	165	300	440	2 500	1 000	1 000	1 500	2 500	1 000	135	IATA:	
32	C550	CESSNA		550 Citation 2	L	6 850	13 200	145	240	360	2 000	1 500	1 000	1 500	3 000	1 000	115	IATA: CNJ	
33	AN12	ANTONOV		An12	M	61 000	10 200	160	220	310	1 500	1 000	800	1 000	1 500	1 500	130	IATA: ANF	
34	AN26	ANTONOV		An26	M	24 000	8 100	150	200	235	1 500	1 000	800	1 500	1 500	1 500	120	IATA: AN6	
35	F70	FOKKER		70 (FOKKER)	M	36 740	10 800	155	250	430	3 000	1 500	1 000	1 500	3 500	800	125	IATA: F70	
36	B739	BOEING		B737-900	M	79 015	12 600	165	290	460	3 000	2 000	1 500	1 500	3 500	1 000	149	IATA: 739	
37	B462	BRITISH AERC		BAe-146-200	M	42 200	9 600	155	220	380	1 500	2 000	500	1 500	3 000	800	125	IATA: 142 /	
38	CRJ2	CANADAIR		CANADAIR RJ-200	M	21 523	12 600	165	250	420	3 000	2 500	1 000	1 500	3 000	1 000	135	<null>	
39	CRJ9	CANADAIR		CANADAIR RJ-900	M	36 510	12 600	230	260	464	3 000	2 000	1 500	1 000	3 000	1 000	170	<null>	
40	DC10	MCDONNELL C		DC-10	H	259 459	12 600	180	290	510	2 000	1 500	1 000	1 500	1 500	1 000	150	<null>	
41	F50	FOKKER		FOKKER 50	M	20 820	7 800	130	210	240	1 500	1 000	1 000	1 500	1 500	1 500	120	<null>	
42	DH8D	BOMBARDIER		Dash 8 Q400	M	28 998	7 800	150	210	360	3 500	1 500	1 200	1 500	1 500	1 500	121	IATA: DH4	
43	F100	FOKKER		100 (FOKKER)	M	43 390	10 800	165	250	405	2 500	1 500	1 000	1 500	3 500	800	135	IATA: 100	
44	E170	EMBRAER		Embraer 170	M	35 995	12 500	190	300	460	3 400	2 200	1 600	2 000	2 600	2 300	138	IATA: E70	
45	MD82	MCDONNELL C		MD-82	M	67 812	11 400	170	290	330	2 500	2 000	1 000	1 000	1 500	1 500	140	IATA: M80 /	
46	L360	LEARJET		LEARJET 60	M	10 659	15 800	170	290	455	4 000	3 000	2 000	1 500	3 500	1 000	140	IATA:	
47	AT45	ATR		ALenia ATR-42-500	M	18 600	8 100	140	220	300	1 500	1 000	1 000	1 500	1 500	1 500	110	IATA: AT5	
48	AT72	ATR		ALenia ATR-72	M	21 500	7 800	140	210	275	1 500	1 000	1 000	1 500	1 500	1 500	120	IATA:	
49	SU95	SUKHOI		Superjet 100	M	45 880	12 500	200	280	450	2 500	1 500	1 500	1 000	2 800	1 500	160	IATA:	
50	B717	BOEING		B717-200	M	54 885	10 500	165	270	435	3 000	3 000	1 500	1 500	3 500	800	139	IATA: 717	
51	C560	CESSNA		560 Citation 5 Ultra	M	7 210	14 000	135	240	430	2 500	3 000	1 500	1 500	4 000	1 000	110	Accommodat	

Рис.3.2 Відображення бази льотних характеристик повітряних суден

Створена модель характеристик повітряних суден розроблялася спільно з авторами моделюючого комплексу роботи авіадиспетчера і на сьогоднішній день застосовується в програмі FusionLib, яка є частиною моделюючого комплексу (рис. 3.3). Бібліотека довідкових даних FusionLib є довідковим додатком моделюючого комплексу роботи авіадиспетчера, при цьому слід зазначити, що частина довідкових даних з бібліотеки використовується безпосередньо в модулі робочого місця диспетчера радіолокаційного контролю.

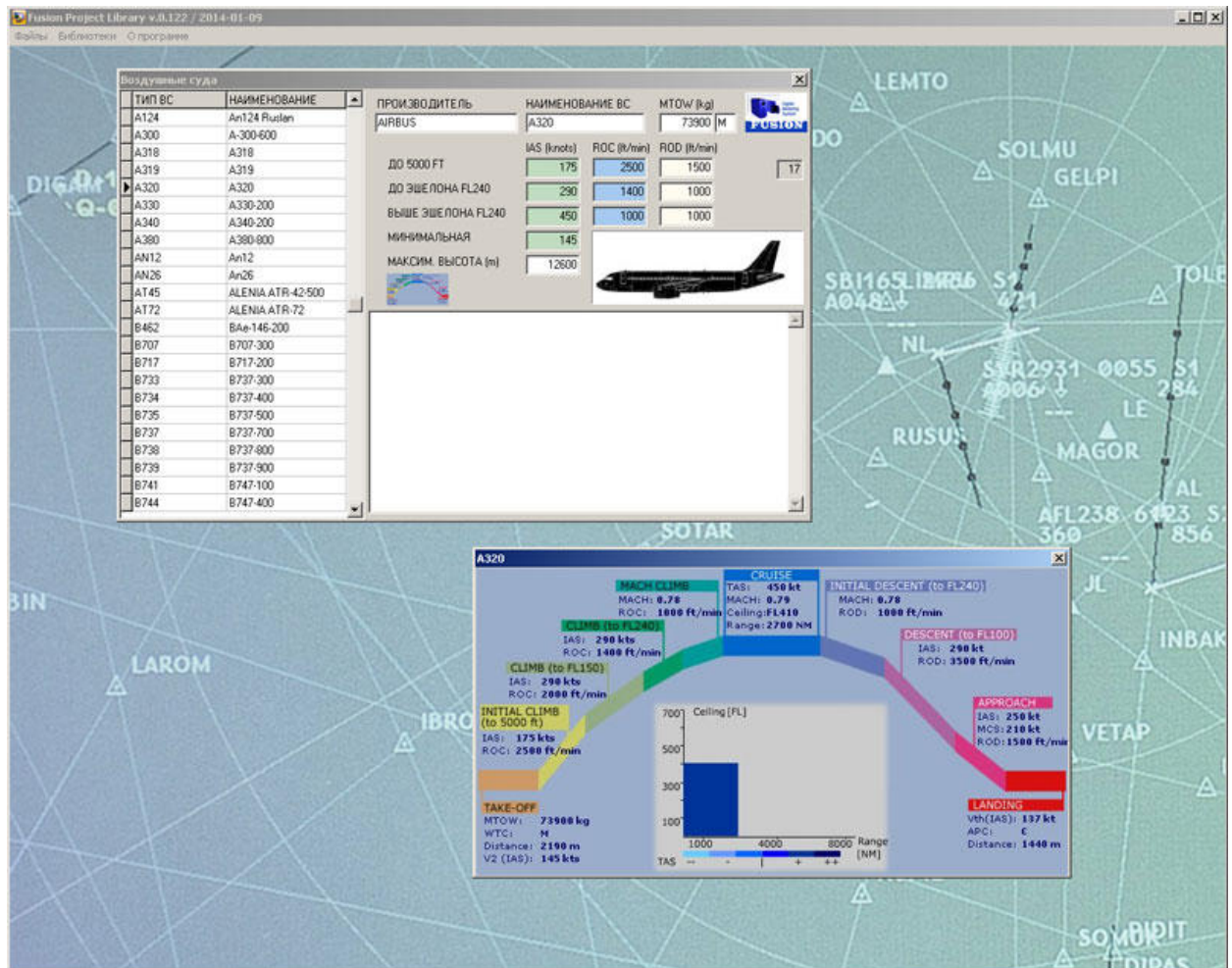


Рис.3.3 Рабочее вікно програми FusionLib.

Побудована нами модель польоту повітряних суден дозволяє почати створення моделі обліку впливу зсуву вітру на політ повітряних суден на малих висотах.

3.3 Модель обліку впливу зсуву вітру для моделюючого комплексу роботи авіадиспетчера

Модель впливу зсуву вітру на політ повітряного судна на фінальному етапі заходу на посадку будуватимемо з двох складових частин:

1. Власне модель впливу зсуву вітру, як короточасного значного зміни швидкості та напрямки руху повітряної маси у горизонтальній та

вертикальній площині, та впливу зсуву вітру на параметри (напрямок, швидкість, висота польоту) руху повітряного судна.

2. Модель прийняття рішення екіпажем повітряного судна в залежності від відповідності поточних параметрів руху повітряного судна критичним параметрам, після перевищення значень яких екіпаж повітряного судна приймає рішення припинити захід на посадку та виконати відхід на друге коло.

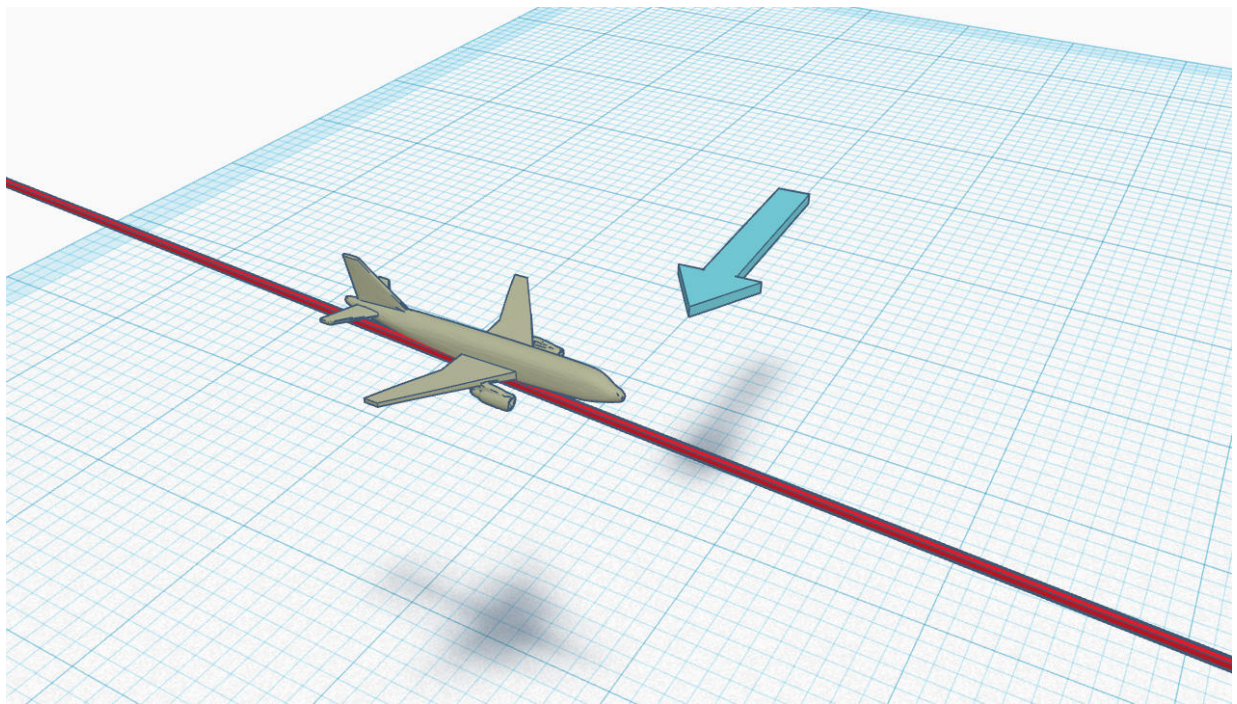


Рис.3.4а Відображення послідовних етапів урахування впливу параметрів вітру на політ повітряного судна. Початкове положення повітряного судна на глісаді

Модель впливу зсуву вітру (рисунок 3.5) будуємо за тією ж схемою, яка вже застосовується в моделювальному комплексі: при прорахунку розташування повітряного судна та параметрів його руху спочатку проводиться «зсув» повітряного судна повітряним потоком від його поточних координат, а потім віртуальний екіпаж коригує параметри руху повітряного судна виходу на задану траєкторію. Слід зазначити, що при корекції параметрів руху повітряного судна для компенсації усунення повітряного судна в результаті зсуву вітру, величини корекції (по курсу,

поздовжньої та вертикальної швидкостей) не можуть виходити за межі льотно-технічних характеристик повітряних суден.

Графічне відображення такої моделі компенсації зсуву вітру (бічного) показано на рисунках 3.4а, 3.4b та 3.4с.

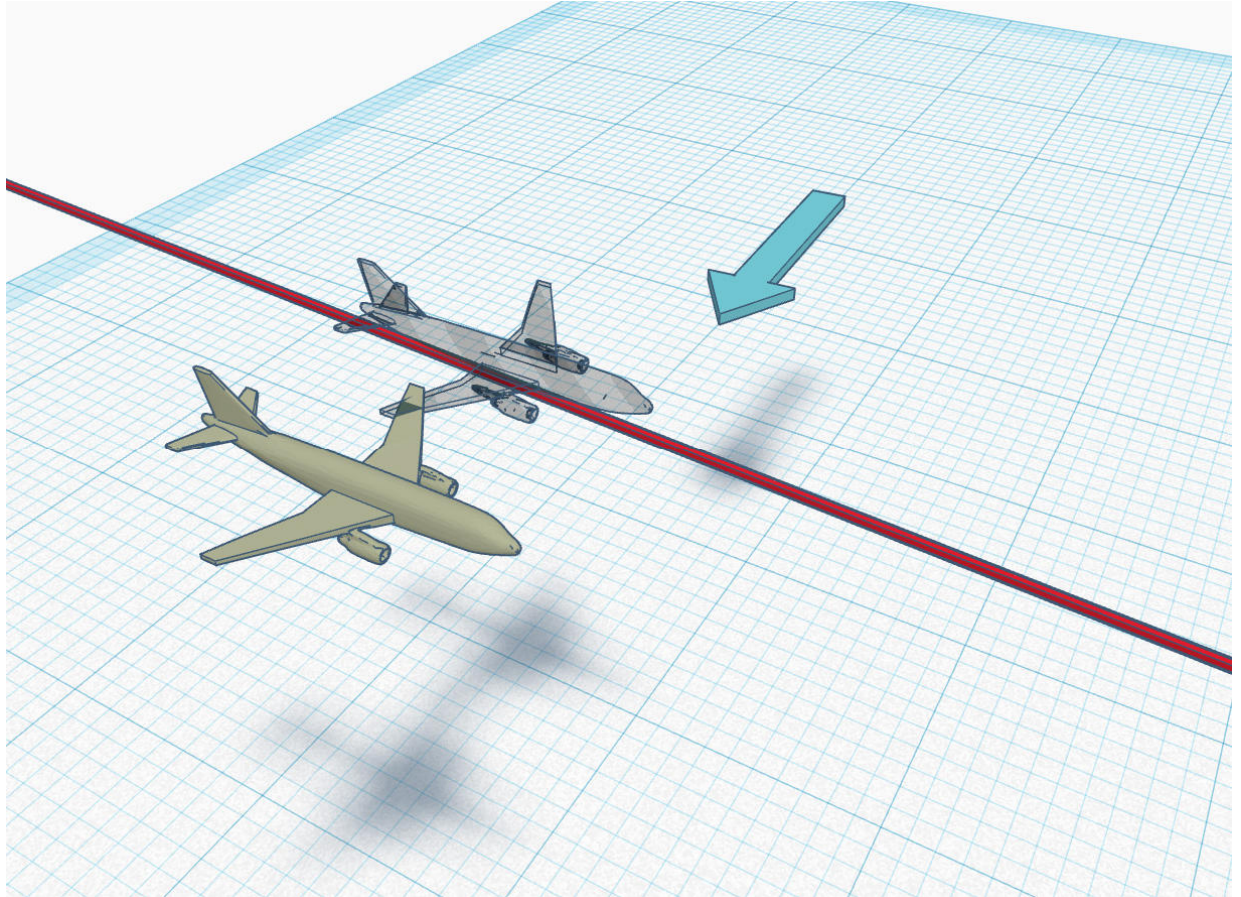


Рис.3.4b Відображення послідовних етапів урахування впливу параметрів вітру на політ повітряного судна. Зміщення повітряного судна щодо глісади вітром

На рисунку 3.4а показано початкове положення повітряного судна щодо лінії заданого шляху (у нашому випадку глісади) після прорахунку його просторового положення.

Аналогічно покажемо модель компенсації зсуву вітру в поздовжньому осі руху повітряного судна напрямку (рисунки 3.4а - 3.4с).

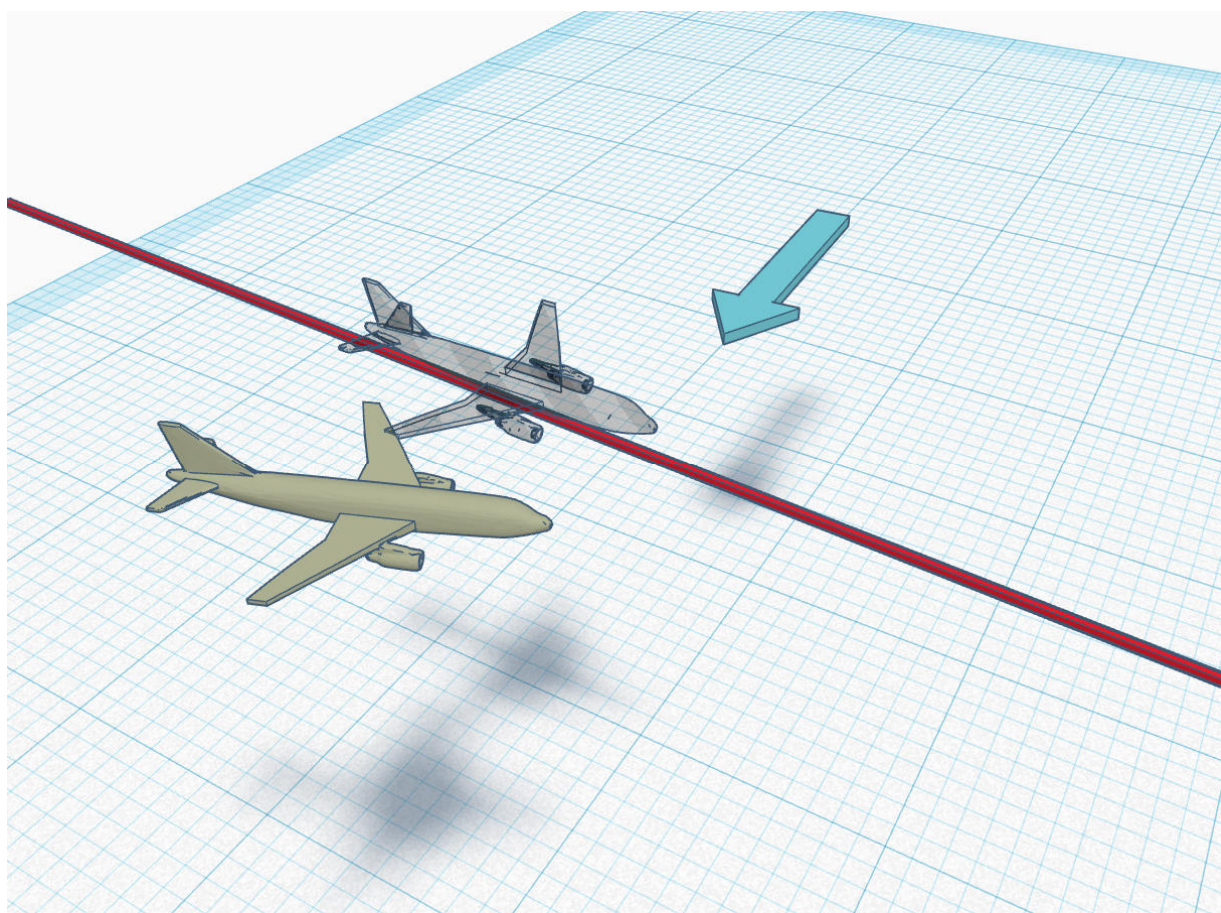


Рис.3.4с Відображення послідовних етапів урахування впливу параметрів вітру на політ повітряного судна. Коригування параметрів руху повітряного судна для повернення на глісаду

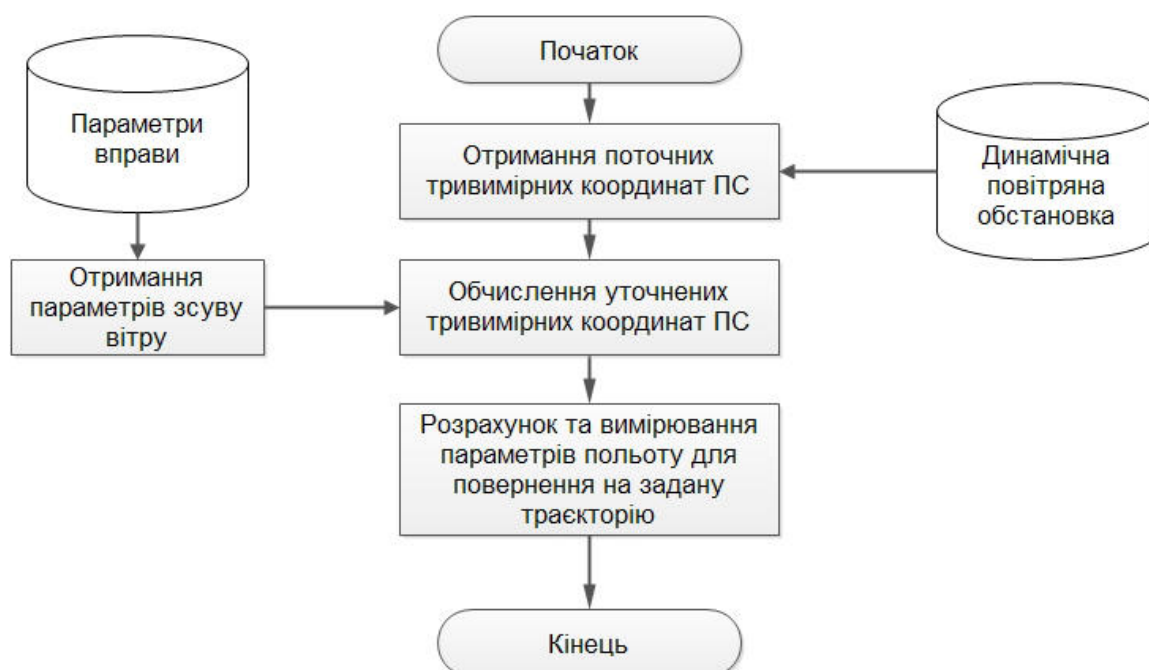


Рис.3.5 Модель впливу зсуву вітру

Наступним етапом у розробці моделі є створення метеорологічного полігону (стандартний елемент у моделювальному комплексі), в якому моделюватиметься зсув вітру. Залежно від поставленої у вправі завдання, ми будемо застосовувати два методи: власне побудова метеорологічного полігону/полігонів або завдання областей зі зсувом вітру у вигляді шарів, обмежених по висоті (тільки в межах передпосадкової прямої, тобто для повітряних суден, що знаходяться на фінальному етапі заходу посадки). Схематичне зображення метеорологічного полігону показано на рисунку 3.6.

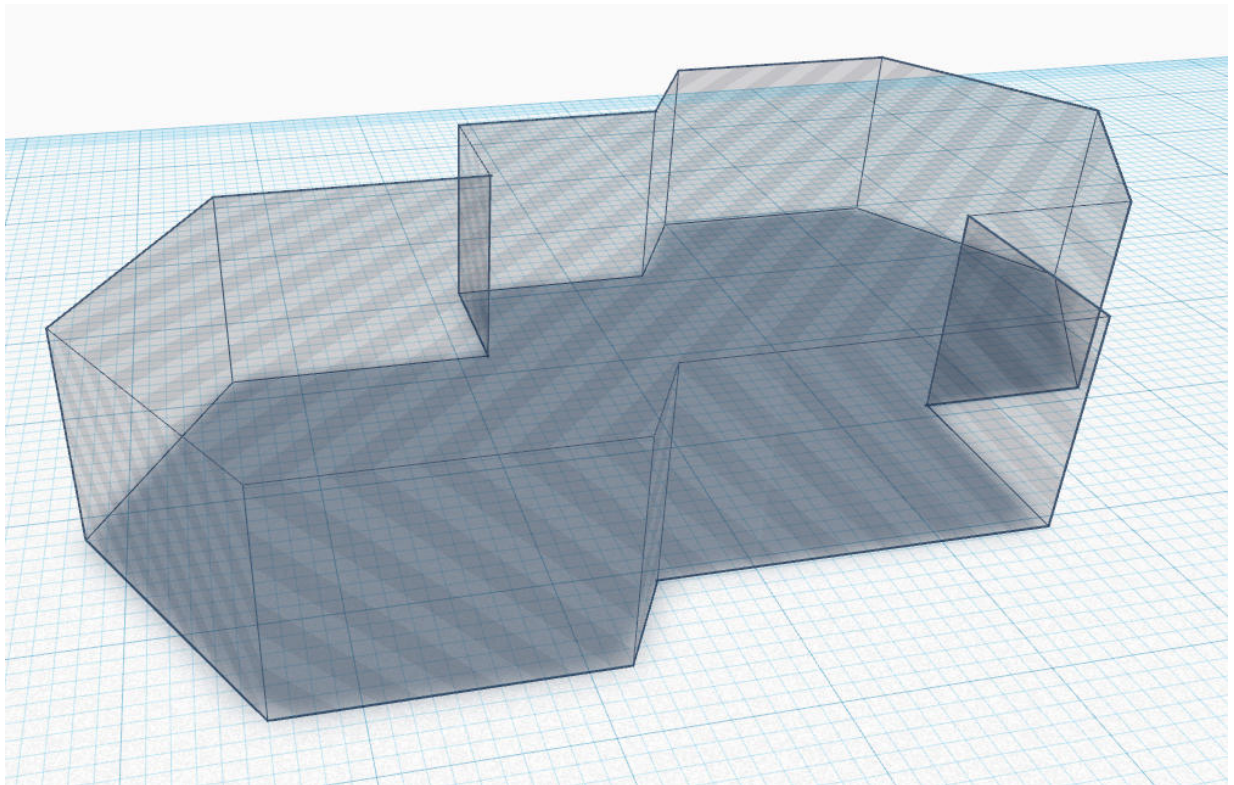


Рис.3.6 Тривимірне представлення метеорологічного полігону в моделюючому комплексі

Головною відмінністю полігону зсуву вітру від стандартного метеорологічного полігону є спосіб визначення швидкості вітру. У полігоні зсуву вітру ми застосовуємо спосіб визначення швидкості вітру, заснований на градієнті.

Градієнт (від латів. *gradiens*, рід. відмінок *gradientis* — крокуючий, зростаючий) — вектор, що своїм напрямком вказує напрямок найбільшого

зростання деякої величини, значення якої змінюється від однієї точки простору до іншої (скалярного поля), а за величиною (модулем) рівний швидкості зростання цієї величини у цьому напрямі. Наприклад, якщо взяти як висоту поверхні землі над рівнем моря, то її градієнт у кожній точці поверхні буде показувати «напрямок самого крутого підйому», і своєю величиною характеризувати крутість схилу.

З математичної точки зору на градієнт можна дивитися як на:

1. Коефіцієнт лінійності зміни значення функції багатьох змінних змін значення аргументу.
2. Вектор у просторі області визначення скалярної функції багатьох змінних, складений із приватних похідних.
3. Рядки Матриці Якобі містять градієнти складових скалярних функцій, з яких складається векторна функція багатьох змінних..

Простір, на якому визначено функцію та її градієнт, може бути, взагалі кажучи, як звичайним тривимірним простором, так і простором будь-якої іншої розмірності будь-якої фізичної природи або чисто абстрактним (безрозмірним). Термін вперше з'явився в метеорології, а в математику було введено Максвеллом у 1873 році. Позначення: **grad** теж запропонував Максвелл.

У нашому випадку швидкість вітру обчислюється за формулою:

$$V_w = \frac{dV}{dH} * H + V_0,$$

де:

V_w – швидкість вітру на висоті (щодо «полігону зсуву вітру»)

dV – величина зміни швидкості вітру

dH – величина зміни висоти

H – висота (щодо «полігону зсуву вітру»)

V_0 – початкова швидкість вітру на початковій позначці «полігону зсуву вітру».

Завершальним етапом нашої моделі буде визначення умов, за яких комп'ютерний екіпаж має приймати рішення щодо виконання повторного заходу на посадку. Словесний опис моделі наступне: якщо в процесі виконання заходу на посадку на фінальному етапі повітряне судно ухилилося за допустимі межі за висотою та / або віддалення від продовженої осі злітно-посадкової смуги, або польотна конфігурація повітряного судна виходить за межі за значеннями курсу, тангажу, і швидкості, і повітряне судно протягом заданого проміжку часу не усунуло відхилення за цими параметрами, екіпаж виконує процедуру повторного заходу на посадку.

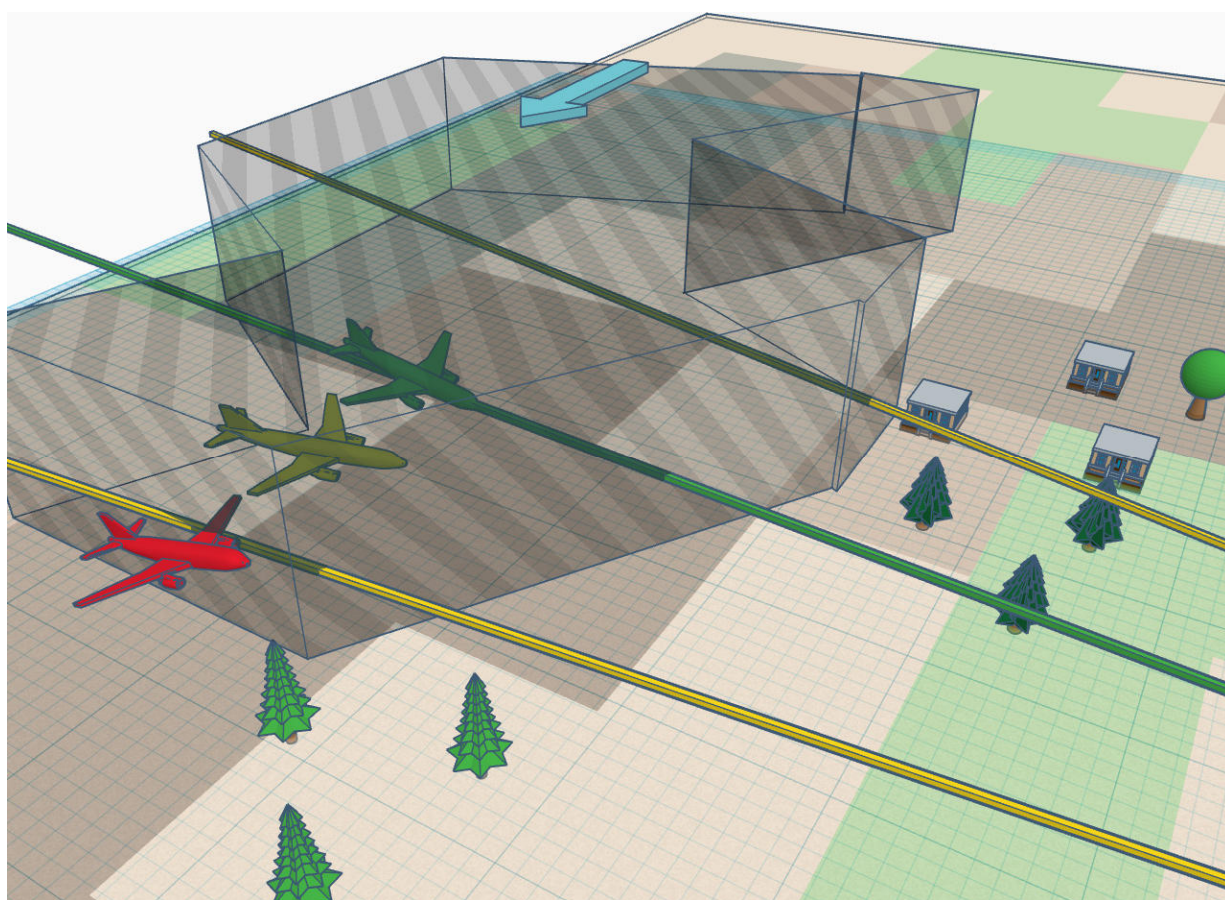


Рис.3.7 Вплив зсуву вітру на політ повітряного судна на фінальному етапі заходу на посадку.

Граничні відхилення від значень повинні задаватися у спеціальних розділах вправи та обов'язково бути доступні учню. Стандартні значення цих параметрів необхідно отримати з посібника з льотної експлуатації конкретного типу повітряного судна.

Автоматизація процесу вибору рішення про виконання повторного заходу на посадку в залежності від зміни польоту повітряного судна, незалежно від дій пілота-оператора (або при його відсутності, як у процедурних тренажерах), дозволить підвищити достовірність моделювання динамічної повітряної обстановки та непрямими методами (без безпосередньої вказівки у маршруті руху повітряного судна) регулювати складність вправи.

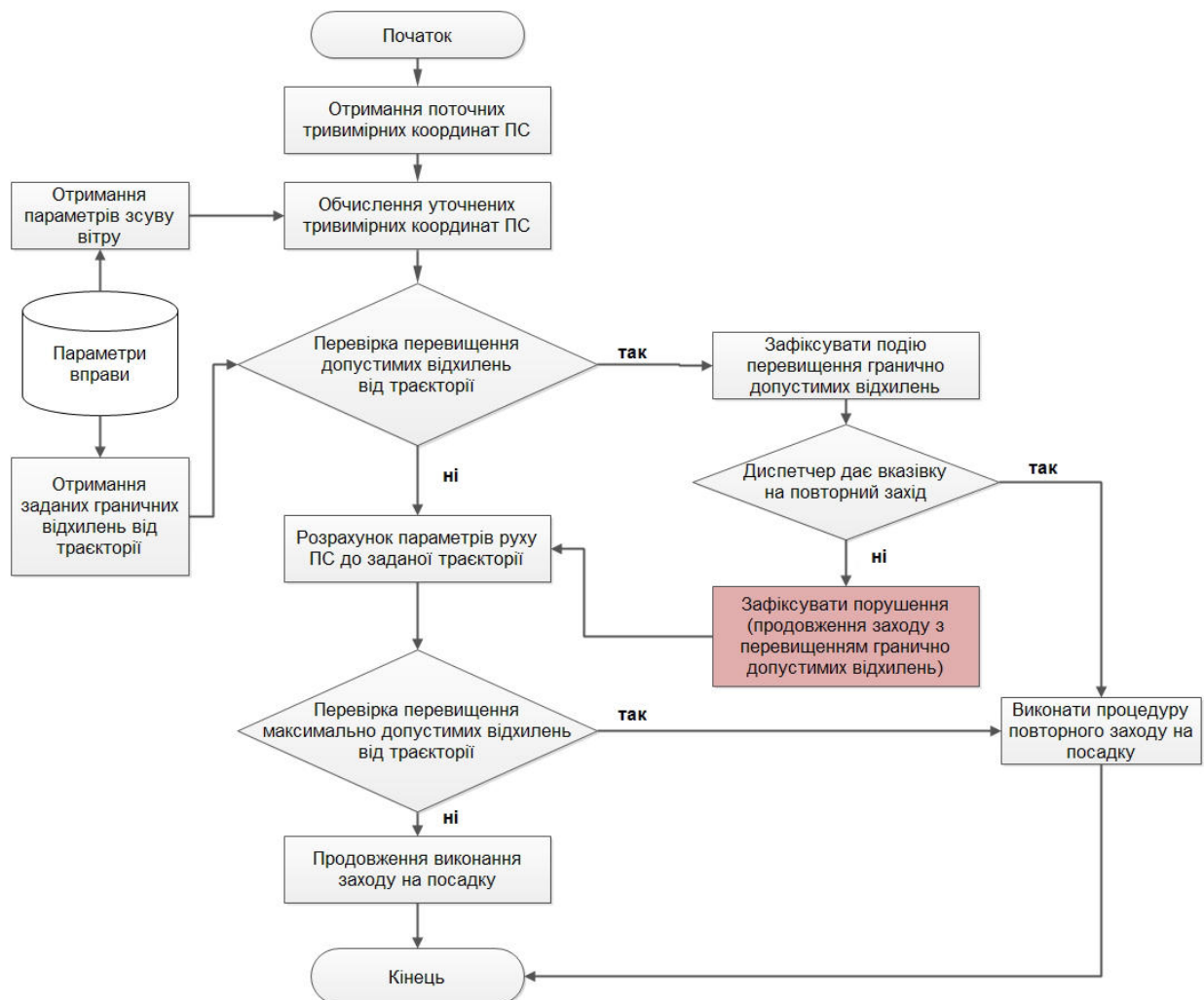


Рис.3.8 Схема моделі прийняття рішення екіпажем повітряного судна щодо виконання повторного заходу на посадку.

Крім графічного представлення моделі прийняття рішення про виконання повторного заходу на посадку, ми побудували принципову схему алгоритму роботи цієї моделі, яка показана на рисунку 3.8. У схему включено

етап розрахунку розташування повітряного судна з урахуванням впливу вітру.

Розглянемо схему алгоритму прийняття рішення екіпажем повітряного судна про виконання повторного заходу на посадку.:

1. Отримуємо поточні тривимірні координати повітряного судна.
2. Проводимо перерахунок координат з урахуванням впливу зсуву вітру. Перерахунок полягає у «коригуванні» положення повітряного судна у вертикальній та горизонтальній площині на величину зсуву. Параметри зсуву вітру (вертикального та / або горизонтального) отримуємо з параметрів вправи – поточної метеорологічної обстановки у заданому обсязі повітряного простору.

3. Перевіряємо відповідність уточнених координат положення повітряного судна із зоною гранично допустимих відхилень при заході на посадку.

4. Якщо повітряне судно знаходиться усередині зони гранично - допустимих відхилень (повітряне судно жовтого кольору рисунку 3.7), то коригуємо параметри руху повітряного судна (за курсом та/або висотою польоту) для виходу на задану траєкторію руху. Повітряне судно продовжує процедуру заходу на посадку. Якщо повітряне судно вийшло за зону гранично - допустимих відхилень (повітряне судно червоного кольору рисунку 3.6), то екіпаж повітряного судна чекає на команду від диспетчера на виконання повторного заходу на посадку і, у разі її відсутності, фіксується помилка «Продовження заходу з перевищенням гранично - допустимих відхилень» та екіпаж продовжує виконувати захід на посадку. У разі надходження команди від диспетчера на виконання повторного заходу на посадку, екіпаж повітряного судна виконує передбачені процедури. Також видається необхідним при виявленні значних відхилень повітряного судна від зони гранично - допустимих відхилень передбачити режим, коли екіпаж повітряного судна самостійно приймає рішення припинити захід на посадку з обов'язковим інформуванням диспетчера про прийняте рішення.

Таким чином, при використанні моделі метеорологічного явища «зсув вітру» ми отримуємо додатковий критерій оцінювання роботи авіадиспетчера та додатковий ускладнюючий фактор у вправі – відхід повітряного судна на друге коло при виконанні заходу на посадку. Зазначений ускладнюючий фактор є динамічним, тобто не визначається параметрами вправи, залежить від дій авіадиспетчера і може призвести до підвищення складності вправи.

У моделюючому комплексі роботи авіадиспетчера нами (у безпосередній співпраці з авторами моделюючого комплексу) було створено програмну реалізацію моделі обліку зсуву вітру, листинг функцій з коментарями наведено нижче:

Функція обчислює напрямок вектора зсуву вітру. Вхідний параметр – поточний рівень польоту повітряного судна.

```
function GetWDirection(alt : integer) : integer;
begin
    if alt <= 2000 then Result := MeteoWind.d1500;
    if (alt > 2000) and (alt <= 4000) then Result := MeteoWind.d3000;
    if (alt > 4000) and (alt <= 6000) then Result := MeteoWind.d5000;
    if (alt > 6000) and (alt <= 8000) then Result := MeteoWind.d7000;
    if (alt > 8000) and (alt <= 11000) then Result := MeteoWind.d9000;
    if (alt > 11000) and (alt <= 13000) then Result := MeteoWind.d12000;
    if alt > 13000 then Result := MeteoWind.dupper;
    Result := Result + 180;
    if Result > 359 then
        Result := Result - 360;
    end;
```

Функція отримання даних та переведення швидкості вітру у формат, що використовується для розрахунку положення повітряного судна. Вхідний параметр – поточний рівень польоту повітряного судна.

```

function GetWSpeed(alt : integer) : integer;
begin
    if alt <= 2000 then Result := MeteoWind.s1500;
    if (alt > 2000) and (alt <= 4000) then Result := MeteoWind.s3000;
    if (alt > 4000) and (alt <= 6000) then Result := MeteoWind.s5000;
    if (alt > 6000) and (alt <= 8000) then Result := MeteoWind.s7000;
    if (alt > 8000) and (alt <= 11000) then Result := MeteoWind.s9000;
    if (alt > 11000) and (alt <= 13000) then Result := MeteoWind.s12000;
    if alt > 13000 then Result := MeteoWind.supper;
    Result := Trunc(Result / 3.6);
end;

```

Фрагмент процедури обчислення координат повітряного судна з урахуванням зсуву вітру

```

// BITEP !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
// "зрушити" положення НД вітром
wcurs := GetWDirection(Alt);
wSpeed := GetWSpeed(Alt);
crd := CalcCoord(crd, wCurs, wSpeed, TimeScale);
// BITEP !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

ВИСНОВКИ

1. Вивчено причини виникнення небезпечного метеорологічного явища зсув вітру, а саме зміна вітру в приземному шарі, внаслідок обтікання перешкод та внаслідок впливу грозової діяльності
2. Проведено аналіз впливу вітру на політ повітряних суден на етапі заходу на посадку: сили, що діють на повітряне судно, вплив зсуву вітру на швидкість повітряного судна, класифікація інтенсивності зсуву вітру
3. Вивчено існуючу модель польоту повітряного судна в комплексі роботи авіадиспетчера. Грунтуючись на даних ресурсу Aircraft Performance Database Євроконтролю, запропоновано зміни до моделі льотних характеристик повітряних суден, які дозволяють удосконалити облік параметрів польоту повітряних суден на етапі заходу на посадку.
4. Розроблено модель обліку впливу зсуву вітру на політ повітряних суден на фінальному етапі заходу на посадку, модель реакції екіпажу повітряного судна на зсув вітру та прийняття рішення про виконання повторного заходу на посадку, що дозволить підвищити якість моделювання динамічної повітряної обстановки в умовах зсуву вітру.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Авіаційні правила України «Обслуговування повітряного руху», ЗАТВЕРДЖЕНО Наказ Державної авіаційної служби України 16 квітня 2019 року № 475, Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 04 липня 2019 р. за № 727/33698. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0727-19#n16> (дата звернення 21.10.2024).
2. Авіаційні правила України «Організація повітряного руху», Затверджено Наказ Державної авіаційної служби України 09 грудня 2021 року № 1920, Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 07 лютого 2022 р. за № 165/37501. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0165-22> (дата звернення 21.10.2024).
3. Авіаційні правила України «Правила використання повітряного простору України». затверджені наказом Державної авіаційної служби України, Міністерства оборони України 11 травня 2018 року № 430/210, Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 14 вересня 2018р. за № 1056/32508. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1056-18#Text> (дата звернення 21.10.2024).
4. Авіаційні правила України “Загальні правила польотів у повітряному просторі України”, затверджені наказом Державної авіаційної служби України, Міністерства оборони України від 06.02.2017 № 66/73, зареєстровані в Міністерстві юстиції України 23.05.2017 за № 654/30522. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0654-17#Text> (дата звернення 21.10.2024).
5. Stewart, 1979: The atmospheric boundary layer, Third IMO lecture, WMO No. 523.
6. WMO Technical Note No. 93, 1969: Vertical wind shear in the lower layers of the atmosphere.

7. Керівництво з навчання у сфері людського чинника /Міжнародна організація цивільної авіації. / Doc 9683 AN/950. Монреаль: ICAO, 1998. 370 с.
8. André and Mahot, 1982: The nocturnal surface inversion and influence of clear air radiative cooling, Journal of the Atmospheric Sciences.
9. Людський фактор під час управління повітряним рухом: / Циркуляр ICAO №241. Монреаль: ICAO, 1993. 39 с.
10. Abele, 1982: Diurnal variability of wind velocity increase with height, Los Alamos National Laboratory Research Paper No. LA-9601-MS.
11. Прогноз розвитку повітряного транспорту до 2025 року. / Циркуляр ICAO 313 - AT/134. Монреаль: ICAO, 2007. 165 с.
12. Pettersson, 1956: Convective clouds and weather, Weather Analysis and Forecasting, Volume 1, 2nd Edition, McGraw Hill.
13. Cole, Allan and Miller, 2000: Vertical wind shear near airports as an aviation hazard, Preprints, Ninth Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Orlando, Florida, American Meteorological Society.
14. Cole, Evans and Rhoda, 1997: Delay reduction due to the integrated terminal weather system (ITWS), terminal winds product, Preprints, Seventh Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Long Beach, California, American Meteorological Society.
15. Joffe, 1984: Power laws and the empirical representation of velocity and directional shear, Journal of Applied Meteorology, Vol. 23, Issue 8.
16. Brooks, 1970: Preliminary study of wind shear in the boundary layer at Melbourne Airport, Meteorology Study No. 19, Australian Bureau of Meteorology.
17. Saissac, et al., 1971: Étude dynamique de la couche 0–100 m, Monographie No. 81 de la Météorologie Nationale, France.
18. McKinley. Evaluating wind flow around buildings on heliport placement, 1984: FAA Report V85-21881.

19. Bedard and LeFebvre, 1983: Downslope windstorms and negative buoyancy forces, Preprints, 13th Conference on Severe Local Storms, Tulsa, Oklahoma, American Meteorological Society.
20. Zipser and Bedard, 1982: Front range windstorms revisited, Weatherwise, United States.
21. Керівництво зі зсуву вітру та турбулентності на малих висотах. / Міжнародна організація цивільної авіації. / Doc 9817-AN/449. 1-е вид. Монреаль: ICAO, 2005. 264 с.
22. Додаток 11 до Конвенції про міжнародну цивільну авіацію. Обслуговування повітряного руху. / 13-е вид. Монреаль: ICAO, 2001. 114 с.
23. Smith, Crook and Roff, 1982: The morning glory: An extraordinary undular bore, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.
24. Ellis and Keenan, 1978: Development of wind shear models and determination of wind shear hazards, FAA Report No. FAA-RD-79-119.
25. Smith and Goodfield, 1981: The 1979 morning glory expedition, Weather, London.
26. Christie and Muirhead, Solitary waves and low altitude wind shear in Australia, Aviation Safety Digest No. 123/3.
27. Додаток 2 до Конвенції про міжнародну цивільну авіацію. Правила польотів. / 10-е вид. Монреаль: ICAO, 2005. 80 с.
28. Людський чинник. Експлуатаційні наслідки в обладнаних передовою технікою кабінах екіпажу: збірник матеріалів № 5. / Циркуляр ICAO 234-AN/142. Монреаль: ICAO, 1992. 53 с.
29. Heald and Mahot, 1981: The dependence of boundary layer shear on diurnal variation of stability, Journal of the Atmospheric Sciences.
30. EUROCONTROL Training Institute APD. URL: <http://contentzone.eurocontrol.int/aircraftperformance>
31. Берард А.Дж. мл. Причини, що породжують зрушення вітру в атмосфері, та методи їх виявлення // Аерокосмічна техніка. 1983. Т.1, №3. с. 13-20.

32. Lopez R.L. FA A moves out on solving windshear problem: Interavia. 1989. 44, №3. P. 260-263.
33. Керівництво із запобігання авіаційним подіям. / Doc 9422-AN/924. 1-е вид. Монреаль: ICAO, 1984. 150 с.
34. Luers J. The effect of heavy rain on wind shear attributed accidents. / ALAA Pap. 1981. №390
35. Додаток 13 до Конвенції про міжнародну цивільну авіацію. Розслідування авіаційних подій. / 11-е вид. Монреаль: ICAO, 2016. 74 с.
36. Vasiloff, Brandes, Davies-Jones. An investigation of the transition from multicell to supercell storms, Journal of Climate and Applied Meteorology, July 1986.
37. Глобальна дорожня карта безпеки польотів. Стратегічний план дій щодо безпеки польотів / ICAO, Партнерство «Безпека польотів», 2008.
38. Bennets, McCallum, Grant. Cumulonimbus clouds: an introductory review: The Meteorological Magazine, Meteorological Office, London, No. 115, 198 с.
39. Гусейнов Н.Ш. Диспетчеру управління повітряним рухом та льотчику про метеорологію: Баку: Вид-во Ширвіннешр, 1998. 138 с.
40. Додаток 3 до Конвенції про міжнародну цивільну авіацію. Метеорологічне забезпечення міжнародної аеронавігації. / 19-е вид. Монреаль: ICAO, 2016. 218 с.
41. Керівництво з навчання. Частина F-1. Метеорологія для диспетчерів управління повітряним рухом та пілотів. / Doc 7192-AN/837. 1-е вид. Монреаль: ICAO, 2002. 33 с.
42. Керівництво з авіаційної метеорології. / Doc 8896-AN/893. 10-е вид. Монреаль: ICAO, 2015. 196 с.
43. Словник з міжнародної цивільної авіації. / Doc 9713. -3-е вид. - Монреаль : ICAO, 2007. 832 с.
44. Керівництво по координації між органами обслуговування повітряного руху, службами аеронавігаційної інформації та авіаційними

метеорологічними службами. / Doc 9377-AN/893. 6-е вид. Монреаль: ICAO, 2014. 154 с.

45. Керівництво з метеорологічного забезпечення міжнародних польотів гелікоптерів. / Doc 9680-AN/949. 1-е вид. Монреаль: ICAO, 1996. 43 с.

46. Керівництво з автоматичних систем метеорологічного спостереження на аеродромах. / Doc 9837-AN/454. 2-е вид. Монреаль: ICAO, 2011. 116 с.

47. Керівництво із системи управління якістю при забезпеченні метеорологічного обслуговування міжнародної аеронавігації. / Doc 9873-AN/465. 1-е вид. Монреаль: ICAO, 2007. 66 с.

48. Керівництво з обміну цифровою авіаційною метеорологічною інформацією. / Doc 10003-AN/503. 1-е вид. Монреаль: ICAO, 2014. 52 с.

49. Зсув вітру. / Циркуляр ICAO 186-AN/122. Монреаль: ICAO, 1987. 209 с.

50. Людський чинник. Підготовка льотного екіпажу: оптимізація роботи екіпажу в кабіні (CRM) та льотна підготовка в умовах, наближених до реальних (LOFT): збірник матеріалів № 2. / Циркуляр ИКАО 217-AN/132. Монреаль: ICAO 1989. 73 с.

51. Герасьов В.А. Підготовка диспетчерів управління повітряним рухом до попадання повітряних суден у зсув вітру *«АВІАЦІЯ, ПРОМИСЛОВІСТЬ, СУСПІЛЬСТВО»*: матеріали V Міжнародн. наук.-практ. конф., 16 травня 2024 року, м. Кременчук.

52. Авіаційні правила України «Метеорологічне обслуговування цивільної авіації», Затверджено Наказ Державної авіаційної служби України 09 березня 2017 року № 166, Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 05 вересня 2017 р. за № 1092/30960. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1092-17> (дата звернення 21.10.2024).