

Трюхан О.М.

Національний авіаційний університет

ПОЛЬОТИ В УМОВАХ АТМОСФЕРНОЇ ТУРБУЛЕНТНОСТІ

У статті досліджуються фізичне підґрунтя польоту літаків в умовах особливого стану атмосфери, який характеризується неупорядкованим, хаотичним рухом – так званою турбулентністю. Розглядаються особливості руху повітря в купових хмарах та грозової діяльності.

При польоті в неспокійній атмосфері можуть відчуватись різкі та сильні удари по корпусу літака, з'являється бовтанка. Бовтанка може призвести до передчасного виходу з ладу окремих вузлів і елементів конструкції літака, до відмови бортового обладнання, збільшується «відхід» (неточність) гіроскопічних приладів, погіршуються точнісні характеристики систем. Відзначаються нестійкі показання окремих приладів. Реакція літака на порив повітря зокрема залежить від спів розмірності збурених зон повітря і розмірів літака, взаємної орієнтації у просторі вектора швидкості літака та напряму руху повітряної маси, співвідношення швидкостей літака та повітряної маси, аеродинамічних характеристик літака, його маси і т.д.

На деяких літаках на великих приладових швидкостях відбувається зтяжеління управління. Великі зусилля на штурвалі та необхідність постійного контролю положення літака викликають підвищену стомлюваність екіпажу. При польотах у бовтанку зменшується діапазон наявних швидкостей і висот. На малих швидкостях виникає небезпека виходу на кути атаки звалювання, а на великих – перевищення максимального експлуатаційного перевантаження.

Показані аналітична величина швидкості пориву, за якого літак виходить на кути звалювання, її залежність від несучих властивостей літака та похідної коефіцієнта підйомної сили літака по куту атаки. Наведено вплив вертикального пориву на допустиму швидкість горизонтального польоту.

Ключові слова: атмосферна турбулентність, осі вихорів, зміни у часі і просторі, висхідні та низхідні потоки, бовтанка, динамічний та термічний характер, кути атаки, перевантаження, звалювання, емоційне навантаження, умовний порив.

Постановка проблеми. Особливістю стану атмосфери є неупорядкований, хаотичний, вихоровий, так званий турбулентний характер руху повітря. Структура турбулентних рухів досить складна, оскільки осі вихорів орієнтовані в різних напрямках і швидко змінюють своє положення в просторі. Напрямок і швидкість перебігу повітря в турбулентних зонах зазнають різких і швидких змін у часі та просторі. Виникаючи при цьому збурення атмосфери можуть бути різних розмірів, від декількох міліметрів до десятків і сотень кілометрів.

Особливо інтенсивний рух повітря спостерігається в купових хмарах та в районі грозової діяльності. У грозовій хмарі зустрічаються найбільш сильні висхідні та низхідні потоки зі швидкостями до 25 м/с і більше. При польоті в неспокійній атмосфері можуть відчуватись різкі та сильні удари повітряних мас по корпусу літака. Літак ніби здригається, але його становище у просторі змінюється мало. Однак при дії сильних поривів можливі значні зміни положення літака та швидкості його польоту. При цьому змінюються кути атаки та ковзання, а відповідно і перевантаження –

нормальні (n_y) та бокові (n_z), які саме і є причиною бовтанки літака.

Бовтанка не тільки істотно ускладнює керування літаком, але може стати причиною виходу його на неприпустимо великі перевантаження або кути атаки, що супроводжуються руйнуванням конструкції або звалюванням. Бовтанка може призвести до передчасного виходу з ладу окремих вузлів і елементів конструкції літака, до відмови бортового обладнання, збільшується «відхід» (неточність) гіроскопічних приладів, погіршуються точнісні характеристики систем. Відзначаються нестійкі показання окремих приладів. При бовтанці екіпаж відчуває труднощі у витримуванні режиму польоту, виконанні навігаційних вимірювань, зростає емоційне навантаження тощо.

У контексті викладеного питання досліджень поведінки літака в атмосферній турбулентності та відпрацювання заходів запобігання катастрофічних наслідків на сьогоднішній день залишаються проблемними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями поведінки літака при попаданні в турбулентні шари атмосфери займаються стільки скільки

існує авіація. Окремі особливості виконання польотів в умовах значних турбулентних повітряних рухів розглянуто у роботах [3–7, 9–12, 15–19].

В програмах підготовки пілотів літаків, у тому числі і комерційної авіації, звертається увага на особливості пілотування в умовах турбулентності, зсувів вітру [2, с. 912]. При попаданні в зону активної грозової діяльності та турбулентності екіпаж повинен застосувати усі можливості щодо виходу із цієї ситуації включно із зміною маршруту та своєчасним оповіщенням органів повітряного руху стосовно обставин, які склалися [1, с. 12].

За прогнозами кліматологів та метеорологів до 2050–2080 років у зв'язку зі змінами клімату попадання літаків в умови турбулентності під час польотів стане втричі частішим явищем [14, с. 1], тому питання безпеки за великих швидкісних атмосферних градієнтів залишаються актуальними та потребують подальших досліджень для підвищення ефективності заходів щодо безпеки польотів.

Метою статті є викладення фізичної сутності окремих процесів, які мають місце при обтіканні літака турбулентним повітряним потоком з подальшою можливістю відпрацювання заходів, спрямованих на зменшення ймовірності виникнення катастрофічних ситуацій.

Виклад основного матеріалу дослідження. Залежно від впливу турбулентності на літак розрізняють: слабку бовтанку, коли літак злегка здригається (Δn_y не більше $\pm 0,5$); помірну бовтанку, коли літак зазнає частих поштовхів і похитування зі зміною висоти польоту, але суттєві ускладнення пілотування відсутні (Δn_y до 1); сильну бовтанку, коли літак різко здригається і відчуються окремі кидки за різними напрямками, що порушує встановлений режим польоту, при цьому різко змінюються крен, курс, висота польоту, ускладнюється використання автопілоту, пілотажно-навігаційних приладів та ін. ($\Delta n_y > 1$) [10, с. 125].

Для оцінки ймовірності потрапляння літака в потужні пориви повітря необхідно проводити більш досконало збір статистичних даних про турбулентність атмосфери. При обробці даних порив повітря приводить до значення умовного пориву, що має заданий градієнт наростання швидкості і викликає таке ж навантаження, яке викликав дійсний порив. Швидкість такого умовного пориву слід приймати за ефективний. Під поривом розуміють таке переміщення повітряних мас, при якому швидкість руху повітря (стосовно літака) зростає до максимального значення за час менший двох секунд.

При виконанні зльотів та посадок слід пам'ятати, що літаючи на малих висотах, літак значно частіше піддається впливу бовтанки або окремих поривів. Так, наприклад, повторюваність навантажень і перевантажень при польотах на висотах 100–500 м може бути в 5–10 разів більше в порівнянні з середніми висотами. Тому ресурс планера, особливо неманеврених літаків, для польотів на малих висотах значно менше, ніж для польотів на середніх і великих висотах [18, с. 45].

Реакція літака на порив повітря залежить від наступних факторів:

спів розмірності збурених зон повітря і розмірів літака; взаємної орієнтації у просторі вектора швидкості літака та напрямку руху повітряної маси; співвідношення швидкостей літака та повітряної маси; аеродинамічних характеристик літака, його маси. З погляду безпеки польоту найбільше значення мають вертикальні пориви повітря – висхідні і низхідні.

Висхідний вертикальний порив зі швидкістю W_y в перший момент викликає збільшення кута атаки літака (рис. 1 наведено нижче). Льотчик практично спостерігає кидок літака вгору. Приріст кута атаки визначається формулою $\Delta\alpha \approx W_y / V$, де V – істинна (повітряна) швидкість.

Найбільш небезпечними наслідками різкого збільшення вихідного кута атаки можуть бути вихід літака на закритичні кути атаки і збільшення фактичного перевантаження вище допустимого. Тому перед вильотом льотчик повинен ознайомитися з інформацією про можливість попадання в сильну бовтанку. У польоті екіпаж повинен вести візуальні спостереження та використовувати бортовий радіолокатор для обходу грозової діяльності. Для подолання зон бовтанки, що є впливом гір, слід літати над гірським хребтом з перевищенням, рівним щонайменше половини висоти хребта.

Відхід із зони струменевих течій з підвищеною турбулентністю поблизу тропопаузи можна здійснити зміною ешелону по висоті на 1–2 км вниз або вгору. В умовах сильної бовтанки головна увага льотчика повинна зосереджуватися на утриманні літака в прямолінійному горизонтальному польоті. Керувати літаком треба, користуючись авіагоризонтом. Не слід допускати великих кренів і прагнути точно витримувати висоту або кут тангажу. Положення важелів управління двигунами доцільно зберігати постійними. Не слід прагнути точно витримувати швидкість, потрібно утримувати її близькою до рекомендованої. При необхідності змінювати тягу плавним переміщенням важелів управління двигунами. Пам'ятати, що через велику інертність

нманевреного літака навіть значна зміна тяги дає повільну зміну швидкості польоту. Дії рулями також мають бути плавними. Париувати збільшення перевантаження льотчик повинен лише за потужних поривів повітря, що характеризуються тривалим наростанням перевантаження одного знаку. Користуватися кермом напряду не рекомендується.

За виникнення великих коливань кута тангажу, льотчику доводиться частіше втручатися в управління літаком для парирування збурень. Рухи рулями відносно великі. При подальшому збільшенні швидкості польоту збільшуються коливання нормального перевантаження. Закидання перевантаження ускладнюють пілотування і викликають необхідність підтягнути прив'язні реміні. Пілотувати літак доводиться обережніше, чітко дозуючи відхилення штурвалу. Великі зусилля на штурвалі та необхідність постійного контролю положення літака викликають підвищену стомлюваність екіпажу.

При польоті з автопілотом в умовах турбулентності не слід забувати про те, що автопілот може «відключитися» і льотчик повинен буде брати керування на себе. Оскільки головним завданням у цих умовах є стабілізація літака в просторі, коректор висоти та пристрої стабілізації швидкості, числа М тощо повинні бути вимкнені. Дослідження показують, що крім полегшення управління літаком використання автопілоту призводить до зниження середнього рівня перевантажень на 10–15%, що діють на літак у неспокійній атмосфері.

Попадання літака в зону струменевих течій призводить до зміни путьової швидкості та кілометрової витрати палива. Довжина струменевих течій може вимірюватися тисячами, ширина – сотнями, товщина – кількома кілометрами. Швидкості струменевих течій досягають 350 км/год. Основні напрями струменевих течій у стратосфері – із заходу на схід.

При польоті в бовтанку зменшується діапазон наявних швидкостей і висот. На малих швидкостях виникає небезпека виходу на кути атаки звалювання $\alpha_{зв}$, а на великих – перевищення максимального експлуатаційного перевантаження $n_{y\max}^e$.

Для того, щоб літак збільшив кут атаки горизонтального польоту $\alpha_{г.п.}$ до кута атаки звалювання, необхідний наступний порив повітря (рис. 1):

$$W_{y\text{ звал}} = V\Delta\alpha_{зв} = V(\alpha_{зв} - \alpha_{г.п.})$$

Оскільки (при $\alpha_0 = 0$), то

$$\alpha_{г.п.} = \frac{C_{y\text{ г.п.}}}{C_y^\alpha} = \frac{2G}{C_y^\alpha \rho V^2 S};$$

$$W_{y\text{ звал}} = V\alpha_{зв} = \frac{2G}{C_{y\text{ звал}}^\alpha \rho V^2 S}, \quad (1)$$

де: $C_{y\text{ г.п.}}$ – коефіцієнт підйомної сили горизонтального польоту;

C_y^α – похідна коефіцієнта підйомної сили літака по куту атаки;

ρ – густина повітря; S – площа крила літака.

Проаналізуємо отриманий вираз. Чим менше швидкість польоту, тим за меншої величини вертикального пориву літак вийде на кут атаки звалювання. Тому при польоті в турбулентній атмосфері і при ймовірній величині ефективного пориву повітря мінімальна швидкість польоту повинна бути збільшена. Збільшення висоти польоту (зменшення ρ) зменшує значення швидкості пориву (1), що призводить до виходу на $\alpha_{зв}$. Чим більше подовження крила, що призводить до збільшення C_y^α , тим легше літак вертикальним поривом виводиться на режим звалювання.

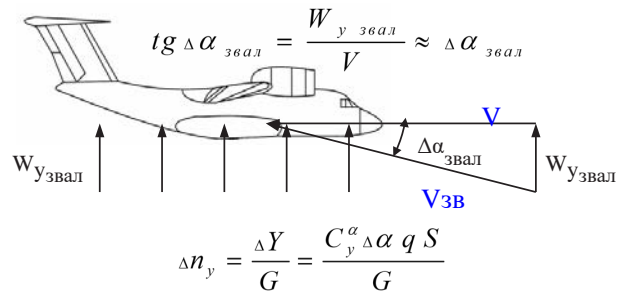


Рис. 1. Вихід літака на кути атаки звалювання за наявності вертикальних поривів

Швидкість польоту не повинна бути достатньо великою, щоб не допустити перевищення перевантаження за міцністю літака, збільшення якого можна визначити за формулою:

$$\Delta n_y = \frac{\Delta Y}{G} = C_y^\alpha \Delta\alpha \frac{\rho V^2}{2G} S = \frac{C_y^\alpha \rho V W_y S}{2G} \quad (2)$$

Як видно, той самий порив на більшій швидкості викликає більшу зміну перевантаження. При заданій швидкості пориву W_y значення перевантаження залежить від швидкості та висоти польоту, питомого навантаження на крило G/S та значення коефіцієнта C_y^α .

Слід зазначити, що вирази (1) та (2) справедливі для випадку, коли швидкість пориву зростає миттєво і потім залишається постійною, обтікання прийнято стаціонарним, а літак сприймається як жорстке тіло. Фактично завжди є проміжок часу, протягом якого швидкість пориву зростає від нульового значення до максимального. За цей час літак отримує вертикальне переміщення і здійснює поворот навколо поперечної осі. Обтікання є фактично нестационарним. З'являються пружні деформації конструкції літака. Тому для зміни перевантаження доцільно враховувати динаміку

навантаження, внаслідок чого формула буде мати наступний вигляд:

$$\Delta n_y = K_d \frac{C_y^\alpha \rho V W_y S}{2G}, \quad (3)$$

де: K_d – коефіцієнт, що враховує динаміку навантаження; ρ – густина повітря.

Коефіцієнт K_d менше одиниці. Перевантаження знижується внаслідок переміщення літака, його повороту навколо поперечної осі OZ , нестационарності обтікання і т.д.

Аеродинамічні сили, викликані пружними деформаціями конструкції літака, ведуть до зменшення згинаючих моментів як внаслідок скидання навантаження з кінців крила, так і в результаті падіння загального перевантаження через зменшення коефіцієнта C_y^α при деформації літака. Розвантажуючий вплив деформацій позначається тим більше, чим більша швидкість польоту (швидкісний напір).

З формули (3) слідує, що на цій висоті польоту і за певної W_y приріст перевантаження тим більше, чим більша швидкість польоту.

Значення перевантаження не повинно перевищувати максимальне експлуатаційне, а приріст перевантаження не повинен перевищувати величину

$$\Delta n_y = n_{y_{\max}}^e - 1. \quad (4)$$

Тому справжня швидкість горизонтального польоту в бовтанку обмежена значенням, що може бути визначено наступною формулою:

$$V = \frac{2G(n_{y_{\max}}^e - 1)}{K C_y^\alpha \rho W_y S}. \quad (5)$$

Чим більше W_y , тим менша допустима швидкість. При одній і тій же W_y істинна швидкість, за якої літак виходить на $n_{y_{\max}}^e$ зі збільшенням висоти польоту зростає.

При польоті в сильну бовтанку рекомендується витримувати швидкість польоту, за якої є запас як за умовою міцності, так і за умов зриву.

На великих висотах поблизу стелі літака політ здійснюється на кутах атаки, близьких до допустимого. Для збільшення запасу по куту атаки слід перейти на зниження, щоб виконувати політ на менших кутах атаки. Поточне і допустиме значення кута атаки контролюються льотчиком за вказівниками кута атаки та перевантаження, якщо вони встановлені на літаку. Доречи, після двох катастроф літаків Boeing-737max8 у 2019 р. піднімається питання щодо повернення вказівника кутів атаки на приладову дошку пілотів.

Таким чином, діапазон висот і швидкостей польоту в умовах бовтанки значно звужується. Найбільш небезпечна бовтанка для літаків, що мають високі несучі властивості крила, коли коефіцієнт C_y^α досить великий.

Зменшення стріловидності, збільшення подовження крила роблять літак більш чутливим до бовтанки. Запас по куту атаки залежить від польотної маси літака. При зменшенні маси запас по куту атаки збільшується. У той же час, чим більша маса, тим інертніший літак і тим менші перевантаження згідно з формулою (3) будуть створюватися при польоті в неспокійній атмосфері. Однак великій масі відповідає менше припустиме перевантаження. Внаслідок цього політ на більш навантаженому літаку в умовах бовтанки не стає менш небезпечним.

Висновки. Наведено фізичну сутність окремих процесів, які мають місце при польоті літака в умовах атмосферної турбулентності. Матеріал доцільно використовувати в якості методичних рекомендацій під час проведення занять з льотним складом при розгляді питань пілотування в особливих умовах польоту.

Список літератури:

1. Загальні правила польотів у повітряному просторі України: Наказ Державної авіаційної служби України від 06.02.2017 № 66/73. <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0654-17>
2. Прийнятні методи відповідності (АМС) та інструктивний матеріал (GM), що роз'яснюють положення Авіаційних правил України «Технічні вимоги та адміністративні процедури для льотних екіпажів цивільної авіації»: Наказ Державної авіаційної служби України від 12 березня 2018 року № 220. <https://avia.gov.ua/wp-content/uploads/2020/02/Nakaz-220-AMC-GM.pdf>
3. Воробйов В.В. Проблеми безпеки польотів при маневруванні на малій висоті. Проблеми безпеки польотів. К.: НАОУ. 1991. С. 5-11.
4. Трюхан О.М. Тактика авіації у локальних війнах та збройних конфліктах: досвід, аналіз, тенденції. – К.: НАОУ, 2005.–340 с, 2005.
5. Алексеев В.В. Бездетнов Н.П. Філософія льотної безпеки. – К.: НАОУ. 1998. 336 с.
6. Трюхан О.М., Осьмак В.Є., Докієнко Л.М. Спеціалізовані комерційні польоти з високим ступенем ризику – проблеми та можливі напрями вирішення. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 34 (73) № 2, ч. 2, 2023. С. 215-221. https://drive.google.com/file/d/1tLRj7zgpFoiQ3PIEIFDbtcN3yvPfo9g5/view?usp=drive_web

7. Баранов А.М. Хмари та безпека польотів. Гідрометвидав. – К.:1983. 98 с.
8. Трюхан О. М., Селіщев С. В., Паращенко Т. В. Деякі проблеми забезпечення якості надання послуг із застосуванням цивільних безпілотних літальних апаратів в Україні та можливі шляхи їх вирішення. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2022. № 1(46). С. 51-57. <https://doi.org/10.30748/nitps>.
9. Ніколаєв Л.Ф. Аеродинаміка та динаміка польоту транспортних літаків. Кіровоград: Льотна академія, 1990. – 392 с.
10. Бехтир П.Т., Бехтир В.П. Практична аеродинаміка літака Іл-76. Харків: ХАІ, 1979. – 154 с.
11. Калачев Г. С. Льотчик та безпека польоту. К.: КПЦА, 1979. 222 с.
12. Котик М. Г., Філіппов В. В. Польоти на граничних режимах. К.: КПЦА, 1977. 239 с.
13. Семенчин В. А., Захаренко В. А., Чмовж В. В. Аеродинаміка та динаміка польоту. Харків : НАУ “ХАІ”, 2003. 381 с.
14. Турбулентність при польотах літаків зростає: вчені назвали причину. URL: <https://dip.org.ua/velika-britaniya/turbulentnist-pry-polotah-litakiv-zrostaе-vcheni-nazvaly-prychynu/>
15. Трюхан О.М. Фактори небезпеки при транспортуванні вертольотом вантажів на зовнішній підвісці. Тези доповіді. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції /Міністерство освіти і науки України, – К.:НАУ, 2022. С. 55-57. URL: <https://meet.google.com/fby-uuix-qng>
16. Соляник П.Н. Експериментальна аеродинаміка. Навчальний посібник / П.Н. Соляник, М.Л. Сургайло, В.В. Чмовж. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т «Харківський. авіаційний інститут», 2007. 96 с.
17. Robert F. Stengel. Flight Dynamics: Second Edition. USA. Princeton University Press. November 2022. 921 p.
18. Івус Г.П. Метеорологічне обслуговування полярної авіації та судноплавства: Конспект лекцій. Одеса: Екологія, 2008. 156 с.
19. Турбулентність у літаку: що це та чим небезпечно. Що таке турбулентність та як вона виникає? Що відбувається з літаком під час турбулентності. URL: <https://discovery-way.ru/uk/poland/turbulentnost-v-samolete-cto-eto-i-chem-opasno-cto-takoe.html>

Trukhan O.M. FLIGHTS IN CONDITIONS OF ATMOSPHERIC TURBULENCE

The article examines the physical basis of aircraft flight in the conditions of a special state of the atmosphere, which is characterized by disordered, chaotic movement - the so-called turbulence. Peculiarities of air movement in cumulus clouds and thunderstorm activity are considered.

When flying in a turbulent atmosphere, sharp and strong impacts can be felt on the body of the aircraft, a bobble appears. The wobble can lead to the premature failure of individual components and structural elements of the aircraft, to the failure of on-board equipment, the «departure» (inaccuracy) of gyroscopic devices increases, and the accuracy characteristics of the systems deteriorate. Oscillations and twitching of instrument arrows are observed. Unstable readings of individual devices are noted. The reaction of the aircraft to the gust of air in particular depends on the co-dimensionality of the disturbed air zones and the size of the aircraft, the mutual orientation in space of the aircraft speed vector and the direction of movement of the air mass, the ratio of the speeds of the aircraft and the air mass, the aerodynamic characteristics of the aircraft, its mass, etc.

On some aircraft, at high instrument speeds, the control is overloaded. Great efforts on the rudder and the need to constantly control the position of the aircraft cause increased fatigue of the crew. When flying in a loop, the range of available speeds and altitudes decreases. At low speeds, there is a danger of going to angles of attack, and at high speeds, there is a danger of exceeding the maximum operational overload. The analytical value of the gust speed at which the aircraft enters the bank angles, its dependence on the bearing properties of the aircraft and the derivative of the lift coefficient of the aircraft at the angle of attack are shown. The effect of vertical gust on the permissible speed of horizontal flight is given.

Key words: *atmospheric turbulence, axes of vortices, changes in time and space, updrafts and downdrafts, swirl, dynamic and thermal character, angles of attack, overload, overturning, emotional load, conditional rush.*