УДК 533.693.048

doi: 10.32620/aktt.2020.2.06

С. Е. АГЕЄВ, Ю. П. МІЛЯЄВ

Національний авіаційний університет, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ КРИЛЕВОГО ПРОФІЛЮ З ДОЩОВИМ ПОТОКОМ

Предметом вивчення в статті є аналіз багатостороннього впливу зливових опадів на політ сучасного повітряного судна. При розгляді різних чинників даного впливу встановлено, що головними негативними наслідками взаємодії повітряного судна з дощовим потоком є утворення на його поверхні тонкого шару води, яка під дією ударів крапель і сил поверхневого натягу призводить до зміни конфігурації крилевого профілю, викликаючи втрату несучих властивостей і збільшення лобового опору повітряного судна. Вплив дощу, що обтікає несучі поверхні можна звести до обліку змін характеристик поверхні, що обтікаються і властивостей повітряного потоку. **Метою** є розробка моделі взаємодії сучасних крилевих профілів з дощовим потоком. **Завданням** є визначення кількості води, що осідає на поверхні профілю крила, розрахунку параметрів водної плівки, що утворюється на його поверхні, і як наслідок цього, зміни дотичного напруження на межі розділу "рідина-повітря". Використовуваний напівемпіричний **метод** розрахунку виявляє значну залежність кількості дощової води, що осідає на поверхні сучасних крилевих профілів від їх геометрії і умов взаємодії з потоком дощових крапель. **Результатом** даній роботи є отримана модель, яка дозволяє моделювати умови обтікання профілю крила в дощового потоці і оцінювати взаємозв'язок інтенсивності дощу з параметрами водної плівки, яка утворюється на профілі. **Висновки.** Аналіз особливостей перебігу дощової плівки по поверхні профілю крила і її впливу на параметри прикордонного шару, показує негативний характер впливу зливових опадів на аеродинаміку літака. Отримані результати дозволяють судити про достовірність використання прийнятої моделі для розрахунку впливу дощу на аеродинамічні характеристики крилевих профілів, і можливості використання отриманих результатів для визначення залежностей аеродинамічних характеристик профілів крила від умов дощового потоку.

Ключові слова: розрахунок параметрів плівки води на поверхні крилевого профілю; моделювання сильного дощу; крилевої профілю; дотичне напруження на межі розділу "рідина-повітря".

Введення

Вплив зливових опадів на політ сучасного повітряного судна має багатосторонній характер.

При аналізі шкідливих впливів, які надає сильний дощ на льотно-технічні характеристики літака [1, 2, 3, 9] можна зробити висновок, що погіршення аеродинаміки у найбільшій мірою визначається формуванням на поверхні крила тонкої водної плівки, яка під дією ударів крапель і сил поверхневого натягу призводить до зміни конфігурації крилевого профілю, викликаючи втрату несучих властивостей і збільшення лобового опору повітряного судна.

До числа не менш важливих факторів слід віднести двохфазність течії, так як наявність крапель дощу та водного туману, що утворюється від розпаду дощових крапель при ударі об поверхню крила, істотно впливає на загальні властивості повітряного потоку, що обтікає літак.

Результати досліджень, що наведені в роботі [4] дозволяють так же вставити особливості спільного

руху водяної плівки у супутньому повітряному потоці.

Фізичне моделювання руху рідини в градієнтному потоці повітря дозволило встановити значні зміни середній товщини водної плівки та хвильових збурень її поверхні під дією градієнтів тиску та турбулентності зовнішнього середовища.

Виникнення хвиль дощової плівки сприяє розвитку шорсткості поверхні крила, що в свою чергу викликати зміни параметрів примежового шару повітря, які безумовно є однією з причин падіння несучих властивостей повітряного судна при польоті в умовах зливових опадів.

Крім того, скупчення води на поверхнях крила, площа яких у сучасних літаків досягає значних розмірів приводить до збільшення маси літака.

Однак сучасні літаки мають достатнє тяго озброєння та, як показують статистичні дані, цієї фактор, що проявляється при польоті повітряного судна в дощі практично не впливає на льотно-технічні характеристики літака.

Таким чином, вплив дощу на обтікання несучих поверхонь можна звести до обліку змін

характеристик поверхні, що обтікається та властивостей повітряного потоку [10, 11].

Постанова задачі

В даній статті представлені деякі результати моделювання осідання дощової вологи на поверхні сучасного крилового профілю повітряного судна при польоті в умовах сильного дощу, розрахунків параметрів водної плівки, що утворюється на поверхні крила, та як слідство цього, змінення дотичного напруження на межі розділу "рідина-повітря", виконаних за допомогою наближеної напівемпіричної моделі впливу опадів на аеродинаміку літака.

На рисунку 1 показана структурна схема моделі розрахунку впливу дощу на аеродинамічні характеристики крилового профілю.

Рис. 1. Модель розрахунку впливу дощу на аеродинамічні характеристики крилового профілю

Застосувавши принцип обертання руху, розглянемо процес обтікання профілю крила повітряним потоком, що містить дощові краплі.

Для того, щоб сформулювати завдання і визначити вхідні дані, необхідно зробити деякі припущення, що стосуються потоку дощових крапель, а саме:

1. Краплі дощу мають однаковий розмір і форму, а саме: сфера діаметром D_k .

2. Краплі дощу не стикаються один з одним, внаслідок розосередженого характеру дощових опадів. Величина середнього прольоту краплі становить кілька метрів.

3. При ударі краплі об поверхню крила, відсутні зворотні викиди вологи в повітряний потік і осіла на крилі вода повністю розтікається по його поверхні. Це припущення, звичайно, дуже сумнівно і далеко не відповідає реальній картині обтікання, що неодмінно

позначається на результатах розрахунків отриманих нижче.

4. Дощовий потік, що має полідисперсний характер розподілу крапель, замінюється на монодисперсній дощ. Причому водність W такого монодисперсного дощу еквівалентна її значенням в реальному дощі.

Швидкість падіння крапель дощу V_k визначається при вирішенні рівнянь руху вільно падаючих крапель.

Крім того швидкість V_k та водність зливи W , може бути оцінена за допомогою наступних апроксимаційних формул наведених в роботі [5]

$$V_k = 9,58(1 - \exp(-\frac{D_k}{1,77}))^{1,147},$$

$$W = \frac{\pi}{6} 10^3 \rho_k \int_0^\infty D_k^3 n(D_k) dD_k,$$

де D_k – діаметр крапель, ρ_k – щільність дощових крапель; $n(D_k)$ – розподіл крапель за розмірами в вигляді кількості крапель падаючих в заданий інтервал в одному кубометрі повітря.

Навіть в самому сильному дощі розосередження крапель достатньо велике, отже, середня відстань між ними, в одиниці об'єму повітря, що залежить від водності дощу і розміру крапель, обчислюється з виразу:

$$\Delta y = 1/\sqrt[3]{6W/(\pi D_k^3 \rho_k)},$$

або ж для цього можна скористатися апроксимаційною формулою, отриманої в результаті аналізу графіків [5], що визначає залежність середньої відстані між краплями від інтенсивності дощу та діаметра крапель

$$\Delta y = 27,837 \exp(-0,3188 \ln R) D_k + 0,64417 \ln R - 5,808,$$

де Δy – середня відстань між краплями, в см; R – інтенсивність дощу, в мм/год; D_k – середній діаметр крапель, в мм.

Великий вплив на розподіл водного шару і кількість води, що осідає на поверхні крила, має кут натікання дощових крапель на крилової профіль β , що залежить від швидкості повітряного потоку V_∞ , що набігає, швидкості падіння дощових крапель V_k та кута атаки α .

Значення кута натікання β можна отримати за допомогою формули

$$\beta = -\alpha + \arctg(\frac{V_k}{V_\infty}).$$

Так як розміри дощових крапель достатньо великі, то вплив геометрії профілю крила на траєкторію їх польоту можливо рахувати відсутнім.

В даному випадку траєкторію польоту дощової краплі можна виразити в системі координат XOY (рис. 2) в наступному вигляді

$$y = -\operatorname{tg}\beta x \pm \frac{\sum_{i=1}^N \Delta y}{\cos\beta}.$$

Рис. 2. Крилової профіль у дощовому потоці

Кількість води, що осідає на профіль крила, є інтегральною величиною і знаходиться зі співвідношення

$$Q = \sum_{i=1}^N (V_k W \Delta y),$$

де $i = 1, 2, \dots, N$ – точки на поверхні профілю крила (див. рис. 2).

Дотичне напруження на кордоні розділу "рідина-повітря" визначається відповідно до емпіричного рівняння [7]

$$\tau_{\text{грі}} = k_1 \rho_2 u_i^2 \operatorname{Re}_{\text{пл}}^n \operatorname{Re}_{\text{x,в}}^{m-0,2}$$

чи з урахування хвильової шорсткості поверхні плівки

$$\tau_{\text{грі}} = [1,0142 * 10^{-2} u_i^2 \rho_2 (-13 + 1,3 * 10^{-4} \operatorname{Re}_{\text{x,в}}^{m-0,2}) A^2 \operatorname{Re}_{\text{x,в}}^{2\text{в}} \operatorname{Re}_{\text{пл}}^{2\text{с}} \mu_2]^{0,909},$$

де ρ_2 – щільність повітря, u_i – швидкість потоку повітря в i -тої точці на поверхні профіля крила; $\operatorname{Re}_{\text{пл}} = \frac{Q}{\mu_1}$ – число Рейнольдса плівки; $\operatorname{Re}_{\text{пл}} = \frac{u_i x_i}{\nu_2}$ – число Рейнольдса повітря, що обчислюється по поздовжній координаті X_i , яка відраховується по поверхні профіля від початку системи координат (див. рис. 1, точка 0); μ_2, ν_2 – відповідно динамічні та кінетичні коефіцієнти в'язкості повітря; k_1, n, m, c та A, B – константи, які визначаються для різних інтервалів значень $\operatorname{Re}_{\text{x,в}}$ і $\operatorname{Re}_{\text{пл}}$.

Для розрахунку товщини δ_i та швидкості поверхні дощової плівки $u_{\text{грі}}$, що осідає в одиницю часу на одиниці довжини крила в i -тої – точці на поверхні профілю, використовується вираз [7]:

$$\delta_i = \sqrt{\frac{2Q_i v_1}{\tau_{\text{грі}} - \frac{2}{3} \left(\frac{dP}{dx} \right)_i \delta_i}} \quad (1)$$

$$u_{\text{грі}} = \frac{\tau_{\text{грі}}}{\mu_1} \delta_i - \frac{1}{2} \left(\frac{dP}{dx} \right)_i \frac{\delta_i^2}{\mu_1}, \quad (2)$$

де Q_i – масова витрата води в плівці;

$\tau_{\text{грі}}$ – дотичні напруження на поверхню плівки;

$\frac{dP}{dx}$ – градієнт тиску повітря;

μ_1, ν_1 – динамічний та кінетичний коефіцієнт в'язкості води в плівці.

Формули (1) і (2) дозволяють врахувати вплив градієнта тиску повітря на основні параметри водної плівки.

Градієнт тиску $\left(\frac{dP}{dx} \right)_i$ визначається "вихровим методом" згідно потенціальної теорії обтікання крила [8] в реченні однорідності повітряного потоку.

Результати

Для оцінки ступеня впливу атмосферних опадів на аеродинамічні властивості несучих поверхонь було проведено обчислювальний експеримент на класичних профілях NACA0012, NACA2211 та високо несущим профілі GA(W)-1.

Математичне моделювання взаємодії дощових крапель з обтічною поверхнею проводилося в діапазоні чисел Рейнольдса $\operatorname{Re} = 0,7 \div 2,2 \times 10^6$.

Виходячи з викладених міркувань для розрахунку параметрів плівкової течії дощової води, що утворюється на поверхні крила, була побудована наближена модель у вхідних даних якої задавалися геометричні характеристики вище вказаних профілів крила, експериментально досліджуваних в аеродинамічній трубі в умовах, що імітують зливовий дощ [3].

Метою експерименту, що проводився в дослідницькому центрі імені Ленглі (США) було визначення розподілу плівки води здовж поверхні профілю крила X та виміри її товщини δ .

На рисунку 3 показані результати, що отримані при розрахунку товщини водної плівки δ на профілі NACA0012 при $C_y=0,26$, $\operatorname{Re} = 7,1 \times 10^5$ (заштриховані знаки – нижня поверхня, незаштриховані – верхня

поверхня), та їх порівняння з експериментальними даними, які опубліковані у роботі [3].

Рис. 3. Товщина плівки на поверхні профіля:

а – $W = 13 \text{ г/м}^3$; б – $W = 16 \text{ г/м}^3$;

-□- – експериментальні значення; -○- – розрахунок

Залежність розрахункових значень швидкості плівки $u_{\text{гр}}$ від різних значень водності дощового потоку показана рисунку 4.

Рис. 4. Змінення швидкості поверхні плівки вздовж хорди крилового профіля:

1 – при $W = 39 \text{ г/м}^3$; 2 – при $W = 31 \text{ г/м}^3$;

3 – при $W = 17 \text{ г/м}^3$

Висновки

Представлена в даній роботі модель дозволяє розраховувати параметри водної плівки, що утворюється на поверхні профіля крила на різноманітних режимах польоту сучасного літака у дощових умовах.

Отримані результати дозволяють судити про достовірність використання прийнятої моделі для розрахунку впливу дощу на аеродинамічні характеристики крилового профілю, та в майбутньому використати отримані результати для

визначання залежність аеродинамічних характеристик профілів крила от умовах дощового потоку.

Література

1. Агеев, С. С. Экспериментальное исследование течения водной пленки в пограничном потоке [Текст] / С. С. Агеев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 3 (110). – С. 58-62.
2. Haines, P. Aerodynamic Penalties of Heavy Rain on Landing Airplanes [Text] / P. Haines, J. Luers // *Journal of Aircraft*. – 1983. – vol. 20, iss. 2. – P. 111-119. Doi: 10.2514/3.44839.
3. Hansman, R. J. Comparative Low Reynolds Number Tests of NACA 64-210, NACA 0012, and Wortmann FX67-K170 Airfoils in Heavy Rain [Text] / R. J. Hansman, A. P. Craig // *AIAA*. – 1987. – Pap. № 259. – P. 1-9. Doi: 10.2514/6.1987-259.
4. Hasting, E. C. Measurements of water film characteristics on airfoil surfaces from wind-tunnel tests with simulated heavy rain [Text] / E. C. Hasting, G. S. Manuel // *AIAA*. – 1985. – Pap. № 259. – P. 1-6. Doi: 10.2514/6.1985-259.
5. Bilanin, A. J. Scaling laws for testing airfoils under heavy rainfall [Text] / A. J. Bilanin // *Journal of Aircraft*. – 1987. – vol. 24, iss. 1. – P. 31-37. Doi: 10.2514/3.45407.
6. Агеев, С. Е. Расчет течения жидкой пленки [Текст] / С. Е. Агеев // *Некоторые вопросы прикладной аэродинамики*: Сб. науч. тр. КИИГА. – 1987. – С. 59-62.
7. Дейч, М. Е. Гидрогазодинамика [Текст] / М. Е. Дейч, А. Е. Зарякин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 384 с.
8. Павловец, Г.А. Методы расчета обтекания сечения крыла идеальным потоком [Текст] / Г. А. Павловец // *Труды ЦАГИ*. – Вып. 1344. – М.: Издательство ЦАГИ, 1971. – 72 с.
9. Yihua, Cao. Effects of rainfall on aircraft aerodynamics [Text] / Cao Yihua, Zhenlong Wu, Zhengya Xu // *Progress in Aerospace Sciences*. – 2014. – Vol. 71. – P. 85-127. Doi: 10.1016/j.paerosci.2014.07.003.
10. Numerical Study of Aerodynamic Efficiency of a Wing in Simulated Rain Environment [Text] / M. Ismail, Cao Yihua, Zhenlong Wu, M. Amjad Sohail // *Journal of Aircraft*. – 2014. – Vol. 51, Iss. 6. – P. 2015-2023. Doi: 10.2514/1.C032594.
11. Wu, Z. Numerical simulation of airfoil aerodynamic penalties and mechanisms in heavy rain [Text] / Z. Wu, Y. Cao, M. Ismail // *International Journal of Aerospace Engineering*. – 2013. – Vol. 2013. – P. 1-13. Article ID 590924. Doi: 10.1155/2013/590924.

References

1. Agehev, S. Ye. Eksperymental'ne doslidzhen-nya rukhu vodyanoi plivky v povitryanomu pototsi [Experimental research of the water film motion in air flow]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2014, no. 3 (110), pp. 58-62.
2. Haines, P., Luers, J. Aerodynamic Penalties of Heavy Rain on Landing Airplanes. *Journal of Aircraft*, 1983, vol. 20, iss. 2, pp. 111-119. Doi: 10.2514/3.44839.
3. Hansman, R. J., Craig, A. P. Comparative Low Reynolds Number Tests of NACA 64-210, NACA 0012, and Wortmann FX67-K170 Airfoils in Heavy Rain. *AIAA*, 1987, Pap. № 259, pp. 1-9. Doi: 10.2514/6.1987-259.
4. Hasting, E. C., Manuel, G. S. Measurements of water film characteristics on airfoil surfaces from wind-tunnel tests with simulated heavy rain. *AIAA*, 1985, Pap. № 259, pp. 1-6. Doi: 10.2514/6.1985-259.
5. Bilanin, A. J. Scaling laws for testing airfoils under heavy rainfall. *Journal of Aircraft*, 1987, vol. 24, iss. 1, pp. 31-37. Doi: 10.2514/3.45407.
6. Agehev, S. Ye. aschet techniya zhidkoy plenki [Calculation of the flow of a liquid film]. *Nekotorye voprosy prikladnoy aerodinamiki* : Sb. nauch. tr. KPIGA – Some questions of applied aerodynamics: Sat. scientific tr. KPIGA, 1987, pp. 59-62.
7. Deytsch, M. Ye. Zaryakin, A. E. *Gidrogazodinamika* [Hydro-gas dynamics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 384 p.
8. Pavlovets, G. A. Методы расчета обтекания сечения крыла идеальным потоком [Methods for calculating the ideal flow around a wing section]. *Trudy TsAGI –Transactions of TsAGI*, Iss. 1344, Moscow, TsAGI Publ., 1971. 72 p.
9. Yihua, Cao., Wu, Zhenlong., Xu, Zhengya. Effects of rainfall on aircraft aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 2014, vol. 71, pp. 85-127. Doi: 10.1016/j.paerosci.2014.07.003.
10. Ismail, M., Yihua, Cao., Wu, Zhenlong, Amjad Sohail, M. Numerical Study of Aerodynamic Efficiency of a Wing in Simulated Rain Environment. *Journal of Aircraft*, 2014, vol. 51, iss. 6, pp. 2015-2023. Doi: 10.2514/1.C032594.
11. Wu, Z., Cao, Y., Ismail, M. Numerical simulation of airfoil aerodynamic penalties and mechanisms in heavy rain. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2013, vol. 2013, pp. 1-13. Article ID 590924. Doi: 10.1155/2013/590924.

Поступила в редакцию 1.3.2020, рассмотрена на редколлегии 15.04.2020

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРЫЛЕВОГО ПРОФИЛЯ С ДОЖДЕВЫМ ПОТОКОМ

С. Е. Агеев, Ю. П. Миляев

Предметом изучения в статье является анализ многостороннего воздействия ливневых осадков на полет современного воздушного судна. При рассмотрении различных факторов данного воздействия установлено, что главными негативными последствиями взаимодействия воздушного судна с дождевым потоком являются образование на его поверхности тонкого слоя воды, которая под действием ударов капель и сил поверхностного натяжения приводит к изменению конфигурации крыльевых профиля, вызывая потерю несущих свойств и увеличения лобового сопротивления воздушного судна. Влияние дождя, обтекающего несущие поверхности можно свести к учету изменений характеристик поверхности обтекает и свойств воздушного потока. **Целью** является разработка модели взаимодействия современных крыловых профилей с дождевым потоком. **Задачей** является определение количества воды, осаждаемой на поверхности профиля крыла, расчета параметров водной пленки, образующейся на его поверхности, и как следствие этого, изменения касательного напряжения на границе раздела "жидкость-воздух". Используемый полумпирической **метод** расчета обнаруживает значительную зависимость количества осаждаемой дождевой воды на поверхности современных крыловых профилей от их геометрии и условий взаимодействия с потоком дождевых капель. **Результатом** данной работы является полученная модель, которая позволяет моделировать условия обтекания профиля крыла в дождевого потоке и оценивать взаимосвязь интенсивности дождя с параметрами водной пленки, которая образуется на профиле. **Выводы.** Анализ особенностей течения дождевой пленки по поверхности профиля крыла и ее воздействия на параметры пограничного слоя, показывает отрицательный характер влияния ливневых осадков на аэродинамику самолета. Полученные результаты позволяют судить о достоверности использования принятой модели для расчета влияния дождя на аэродинамические характеристики крыльевых профиля, и возможности использования полученных

результатов для определения зависимости аэродинамических характеристик профилей крыла от условий дождевого потока.

Ключевые слова: расчет параметров пленки воды на поверхности крыльевых профиля; моделирование сильного дождя; крыльевой профиль; касательное напряжение на границе раздела "жидкость-воздух".

MODELING THE INTERACTION OF THE WING PROFILE WITH RAIN FLOW

S. E. Ageev, Y. P. Miliaiev

The subject of the study is the analysis of the multilateral impact of rainfall on the flight of a modern aircraft. When considering various factors of this impact, it was found that the main negative consequences of the interaction of the aircraft with the rain flow are the formation of a thin layer of water on its surface, which under the influence of drops and surface tension forces changes the configuration of the wing profile, causing loss of load-bearing properties and an increase in frontal aircraft resistance. The influence of rain flowing around the bearing surfaces can be reduced to taking into account changes in the characteristics of the surface and the flow of the airflow. **The goal** is to develop a model for the interaction of modern wing profiles with rain flow. **The task** is to determine the amount of water deposited on the surface of the wing profile, calculate the parameters of the water film formed on its surface, and as a result of this, change the tangential stress at the liquid-air interface. The semi-empirical calculation **method** used reveals a significant dependence of the amount of precipitated rain water on the surface of modern wing profiles on their geometry and the conditions of interaction with the stream of raindrops. **The result** of this work is the resulting model, which allows you to simulate the flow conditions around the wing profile in the rain stream and evaluate the relationship of rain intensity with the parameters of the water film that forms on the profile. **Conclusions.** An analysis of the features of the rain film flow over the surface of the wing profile and its effect on the parameters of the boundary layer shows the negative nature of the effect of rainfall on the aerodynamics of the aircraft. The results obtained allow us to judge the reliability of using the adopted model to calculate the effect of rain on the aerodynamic characteristics of wing profiles, and the possibility of using the results to determine the dependence of the aerodynamic characteristics of wing profiles on the conditions of rainfall molasses.

Keywords: calculation of parameters of water film on the surface of the wing profile; modeling of heavy rain; wing profile; tangential stress at the boundary of the section "liquid-air".

Агеев Сергей Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры аэродинамики и безопасности полетов летательных аппаратов, Национальный авиационный университет, Киев.

Милиаев Юрий Петрович – канд. техн. наук, доцент, проф. кафедры аэродинамики и безопасности полетов летательных аппаратов, Национальный авиационный университет, Киев.

Ageev Sergey Evgenovich – candidate of technical sciences, Associate Professor, Department of Aerodynamics and Safety of Flight Vehicles, National Aviation University, Kyiv,
e-mail: unserv@ukr.net, ORCID Author ID: 0000-0003-4723-4114.

Miliaiev Yuriy Petrovich – candidate of technical sciences, Professor, Department of Aerodynamics and Safety of Flight Vehicles, National Aviation University, Kyiv,
e-mail: gnomidiana@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-5639-4606.