

УДК 533.68

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-377129201562632>

Чмих В. О.<sup>1</sup>, бакалавр, Зілінка В. В.<sup>2</sup>, аспірант, Шквар Є. О.<sup>3</sup>, професор, д.т.н.

## АЕРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕКРАНОПЛАНА ЗІ СТРУМЕНЕВИМ ЗАКРИЛКОМ

**En** The problem of mathematical modeling of aerodynamic characteristics of Wing In Ground-effect (WIG) craft, equipped by the jet flap, is considered in this article. This problem has been studied by authors numerically with the use of several levels of modeling: panel method and approach, based on Reynolds Averaged Navier-Stokes equations, closed by the SST model of turbulence. The basic set of problem parameters includes: angle and speed of jet blowing, distance between WIG craft and ground, wing angle of attack and WIG craft sizes. The obtained numerical data have demonstrated the positive influence of the jet flap on the aerodynamic characteristics such as: lift coefficient and its gradient vs. angle of attack, and, as a result, WIG craft weight decreasing and commercial weight increasing. In addition, the fact of positive influence of the ground effect on the efficiency of the jet flap has been shown and analyzed.

**Ru** В статье рассматривается задача математического моделирования аэродинамических характеристик экраноплана, на крыле которого применен реактивный закрылок. Полученные результаты продемонстрировали позитивное влияние струйного закрылка на аэродинамические и, как следствие, весовые характеристики экраноплана, а также факт увеличения эффективности струйного закрылка благодаря эффекту экрана земли.

### Вступ

Покращення аеродинамічних характеристик літальних апаратів (ЛА) різноманітного призначення і, зокрема, экранопланів є однією з найактуальніших задач сучасної аеродинаміки, розв'язання якої ефективно сприяє проектуванню конкурентоспроможної техніки.

Особливо важливим у даному аспекті є напрямок досліджень, пов'язаний з модифікацією конструкції крила экраноплана, спрямованою на підвищення несучих властивостей. Традиційні для літаків методи збільшення підйімальної сили шляхом застосування засобів механізації передньої та задньої крайки крила не можна вважати ефективними для экранопланів, оскільки вони збільшують масу конструкції, сприяють реалізації ефекту запирання потоку, а також можуть бути небезпечними у

<sup>1</sup> Національний технічний університет України "КПІ",  
кафедра приладів і систем керування літальними апаратами

<sup>2</sup> ДП "Антонов", відділення аеродинаміки

<sup>3</sup> Національний технічний університет України "КПІ",  
кафедра приладів і систем керування літальними апаратами

процесі експлуатації через зменшення відстані від задньої крайки висувного закрилка та нерівної поверхні, над якою рухається екраноплан.

Одним з розповсюджених способів покращення несучих властивостей крил літаків є формування пристінного струменя шляхом інжекції додаткової кількості газу поблизу обтічної поверхні у дотичному до неї напрямку. Практично технологія формування пристінного струменя знаходить широке застосування в конструкціях щілинних засобів механізації крила переважної кількості сучасних літаків, при реалізації різноманітних конструкцій струменевих закрилків, а також при встановленні двигуна над крилом з метою покращення несучих властивостей за рахунок реалізації ефекту Коанда на тій частині, яка обтікається газовим струменем за двигуном. Крім того, пристінні струмені знаходять ефективне застосування як засіб захисту закслених поверхонь від дощу та снігу, а також, навпаки, для охолодження термонапружених поверхонь, зокрема елементів камер згорання від нагрівання [1]. Враховуючи порівняну простоту реалізації щілинних закрилків, можливість управління режимом роботи, а також збільшену ефективність поблизу землі, ідея їх реалізації на крилі екраноплана у вигляді струменевого (реактивного) закрилка для покращення аеродинамічних властивостей крила та більш ефективного використання ефекту екрана землі, що є вкрай актуальним саме для екранопланів, має усі підстави бути запропонованою та вивченою з різних позицій, що і визначає головне спрямування даного дослідження. Крім того, актуальним та перспективним для даного типу літальних апаратів слід вважати впровадження в практику проектування та експлуатації також і інших сучасних реалізацій технологій управління примежовим шаром.

Сучасні дослідження пристінних струменів проводяться у напрямках пошуку та застосування різноманітних шляхів модифікації структури течії. Наочним прикладом цього є безпілотний літальний апарат (БпЛА) *DEMON*, який є спільною розробкою аерокосмічної компанії *BAE Systems*, вчених університету Кренфілда (*Cranfield University*) та ще дев'яти інших британських університетів. БпЛА *DEMON* піднявся в повітря і увійшов в історію як перший літальний апарат, здатний виконувати маневри в повітрі без використання механічних органів керування. Апарат маневрував тільки за рахунок струменів стиснутого повітря, що видуюються через спеціальні сопла, розташовані на зрізах крил літального апарату. У майбутньому така технологія може бути використана для розробки конструкцій нових цивільних і військових літальних апаратів, але і зараз даний приклад є наочною демонстрацією працездатності струменевих засобів управління літальними апаратами [2].

Ефективна оптимізація геометричних та режимних параметрів роботи струменевого закрилка та дослідження впливу такого проектного рішення на динаміку руху, стійкість і керованість екраноплана

передбачають побудову, адаптацію і подальше використання методів як математичного моделювання його обтікання, так і розв'язання спряженої задачі аеродинаміки та динаміки польоту, що обумовлює наукову актуальність даної проблеми.

### **Постановка задачі**

Метою даної статті є визначення та аналіз ряду чинників, що обумовлюють ефективність пропозиції застосування струменевого закрилка на крилі екраноплану з урахуванням фактору надмалих висот польоту та, як наслідок, впливу ефекту екрана землі. Практична значущість висвітлених в статті результатів дослідження полягає в принципово новому компонуванні та застосуванні даної конструкції струменевого закрилка на екраноплані, що в свою чергу дасть можливість покращити несучі та вагові характеристики даного типу ЛА, а також забезпечить ефективну можливість цілеспрямованого впливу на властивості стійкості та керованості. Отже перспективність запропонованої модифікації екраноплана полягає в забезпеченні: економічності, екологічності, стійкості та керованості, маневреності, безпеки руху, поліпшенні льотно-технічних характеристик.

Інформація щодо спроб реалізації струменевого закрилка на крилі екраноплана авторам невідома, але плідність цієї ідеї витікає з можливості зменшення фізичної площі обтічної поверхні і, як наслідок, зменшення вагових характеристик екраноплана. Крім того особливо слід зазначити ту обставину, що така аеродинамічна конфігурація в цілому дозволить підсилити використання екрану землі, який є визначальним ефектом при формуванні підйімальної сили даного типу ЛА і, як результат, поліпшити його несучі властивості.

### **Вплив струменевого закрилка на екраноплан**

Екранний ефект – це збільшення несучих властивостей крила літального апарату при польоті на малих висотах через вплив нерухомої поверхні (екрану) на характеристики обтікання. Тобто крило поблизу екрануючої поверхні створює підйімальну силу не тільки за рахунок зменшення тиску над верхньою поверхнею крила (як у звичайних літаків), а й за рахунок підвищення тиску під нижньою частиною несучої поверхні, що є можливим лише на дуже невеликих висотах (менше аеродинамічної хорди крила). Екранний ефект на 20-30% збільшує підйімальну силу крила і знижує індуктивний опір. Зниження індуктивного опору починається з висоти, яка дорівнює половині розмаху крила, але відчутний ефект проявляється на висоті менше 10% розмаху. Екранний ефект сильно впливає на положення центру прикладання підйімальної сили. При висоті польоту менше 1% середньої аеродинамічної хорди (САХ), підйімальна

сила створюється в основному за рахунок повітряної подушки. Центр прикладання підйимальної сили розташований ближче до передньої кромки крила, ніж при стандартному польоті поза екраном. При збільшенні відстані між крилом та екрануючою поверхнею у процесі зльоту екраноплана і, відповідно, збільшенні швидкості, центр дії підйимальної сили спочатку зміщується в напрямку задньої кромки, а потім повертається, при чому тиск під крилом продовжує зменшуватися, а розрідження над крилом – збільшуватися. Найбільше зміщення відбувається на висоті 5-6% САХ [3].

Струменевий закрилок збільшує підйимальну силу крила головним чином за рахунок ефекту суперциркуляції вертикальної складової реакції струменя. Значення коефіцієнта підйимальної сили на крилі із струменевим закрилком залежить від витрат потужності і при використанні практично всього наявного повітря, що проходить через двигун, може досягати 10-15, тобто бути в 2-3 рази вище. Ці системи відрізняються порівняльною конструктивною простотою та ефективністю і можуть бути реалізовані шляхом тангенціального видування тонких струменів з щілинних сопел при досить великих значеннях імпульсу струменя. Мета реалізації струменевого закрилка окрім покращення несучих властивостей у випадку екраноплана також полягає і в підвищенні маневреності останнього шляхом розширення діапазону тиску стійкої роботи закрилка.

Струменевий закрилок позитивно впливає на всі характеристики екраноплана, а наявність екрану лише покращує його ефективність. Очікуваний ефект полягатиме в наступному:

- При русі екраноплана над екранованою поверхнею наявність струменевого закрилка збільшуватиме позитивний вплив екрану землі. Отже виникає можливість збільшити коефіцієнт підйимальної сили  $C_{ya}$  і забезпечити рух екраноплана на малих висотах завдяки відсутності рухомих елементів механізації звичайного крила.
- Витрати палива зменшаться за рахунок струминного закрилка, оскільки він буде забезпечувати більшу підйимальну силу, що дозволяє зменшити площу і, як наслідок вагу конструкції крила.
- Підвищена надійність та безпека полягає у відсутності рухомих елементів механізації (за виключенням конструкції зміни напрямку сопел), що також зменшить вагу;
- Шкідливий ефект експлуатації транспортних засобів безпосередньо пов'язаний з вихлопними газами від силової установки (СУ). Запропонована модифікація дозволяє більш гнучко керувати потужністю СУ і тим самим підвищити екологічність за рахунок меншої кількості викидів вуглецевого газу;
- На відносній висоті польоту екраноплана, меншій 0.01, де важливим питанням є забезпечення повздовжньої стійкості, даний закрилок суттєво змінюватиме характеристики обтікання крила, особливо за

наявності екрануючої поверхні, тому вплив на характеристики стійкості та керуваності є комплексним фізичним ефектом, який потребує додаткового дослідження.

Для визначення ефективності запропонованого проектного рішення застосування струменевого закрілка, а також для оптимізації його геометричних та режимних параметрів на даному етапі дослідження виконано розрахунок базової (опорної) конфігурації екраноплана з крилом трапецевидної форми з розмірами, що є типовими для літальних апаратів даного типу, а саме:

- розмах  $l = 10-40$  м;
- центральна хорда  $b_0 = 5-15$  м;
- кінцева хорда  $b_k = 2-15$  м;
- видовження крила  $\lambda = 3$  м.

при наступному діапазоні відстаней від землі  $h = \min 0.1-0.5$  м,  $\max 2-6$  м.

Результати розрахунків представлено у найбільш інформативному вигляді для екраноплана, а саме у вигляді залежності аеродинамічного коефіцієнта підймальної сили  $C_{ya}$  від кута атаки  $\alpha - C_{ya}(\alpha)$ . Розрахунки першого етапу дослідження було виконано на основі реалізації панельного методу дискретних вихорів у просторовій постановці шляхом використання програмного пакету "PANSYM". Внаслідок симетрії крила екраноплана розрахункова область містила лише одну консоль крила, яке було дискретизовано 42 перерізами вздовж контура профілю крила та 3 перерізами вздовж розмаху, тобто обтічна поверхня крила була поділена на 82 панелі. Кут атаки в розрахунках змінювався в типовому для екранопланів діапазоні  $\alpha = 10^\circ-18^\circ$ .

Результати проведених розрахунків на основі панельного методу, реалізованого в програмному забезпеченні «PANSYM» для екранопланів з найменшими та найбільшими розмірами з наведеного вище діапазону представлені на рис. 1 ... рис. 4.

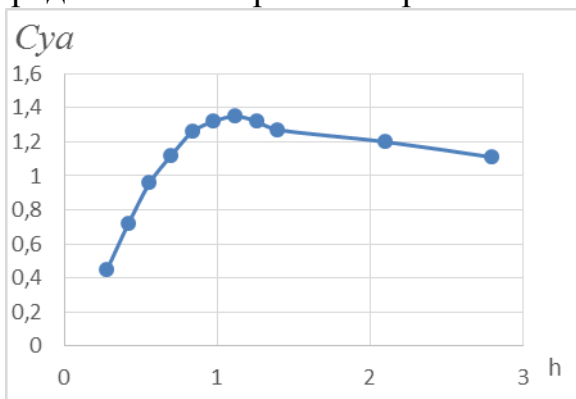


Рис. 1. Залежність коефіцієнта підймальної сили екраноплана малого розміру від висоти польоту над екраном

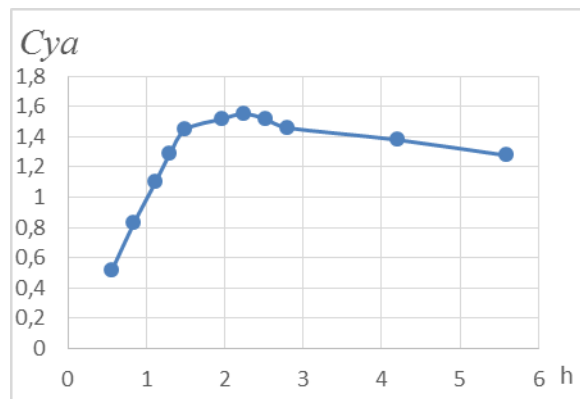


Рис. 2. Залежність коефіцієнта підймальної сили екраноплана великого розміру від висоти польоту над екраном

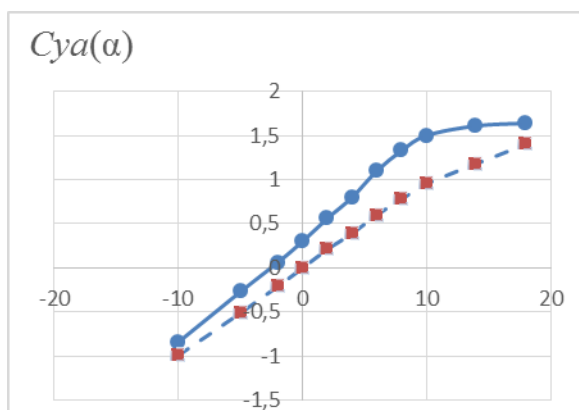


Рис. 3. Залежність коефіцієнта підйомної сили від кута атаки екраноплана малого розміру

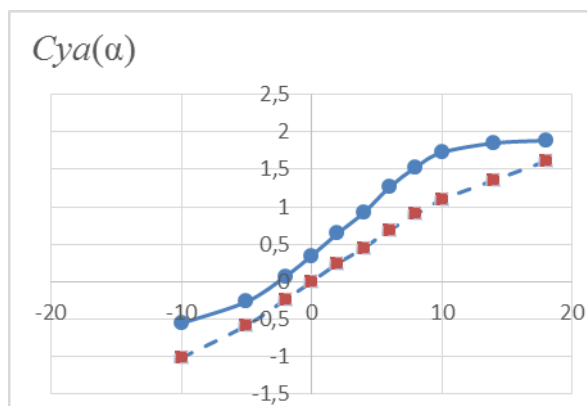


Рис. 4. Залежність коефіцієнта підйомної сили від кута атаки екраноплана великого розміру

Точками круглої форми нанесені результати з урахуванням впливу екрана, а точками квадратної форми – відповідно за відсутності екрана. На рис. 1 і рис. 2 показано залежності коефіцієнта підйомної сили  $C_{ya}$  при сталому куті атаки від різних відстаней між крилом та екраном  $h$ . Спираючись на дані результати отримуємо значення найкращих висот польоту над екрануючою поверхнею для дослідженого діапазону геометричних параметрів екранопланів, при яких забезпечується максимальне значення  $C_y$  і які лежать в інтервалі 1-2 м.

На рис. 3 та рис. 4 наведено залежності  $C_{ya}(\alpha)$  для зазначеного вище діапазону геометричних параметрів екранопланів. З цих залежностей випливає, що вплив екрана землі коректно відтворюється у рамках панельного метода, реалізованого в програмному забезпеченні «Pansym» і полягає в збільшенні несучих властивостей та, зокрема, похідної  $C_y^a$  при одночасному зменшенні критичного кута атаки.

На рис. 5 і рис. 6 проілюстровано особливості формування обтікання профілю при кутах видуву струменя 20 та 35 градусів при польоті на висоті 0,3 м. Усі наведені далі результати отримано на основі числового моделювання в програмному модулі *Fluent* програмного забезпечення «ANSYS».

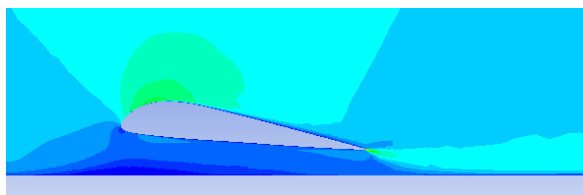


Рис. 5. Обтікання профілю з кутом видуву струменя 20 градусів

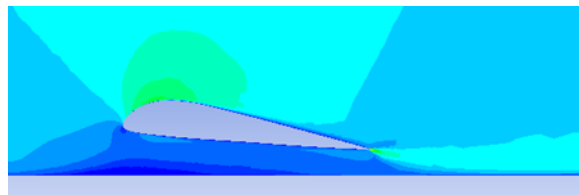


Рис. 6. Обтікання профілю з кутом видуву струменя 35 градусів

Отримані результати наочно свідчать про актуальність, позитивний вплив та економічну доцільність використання струменевого закрилка на крилі екраноплана. На рис. 7 зображено залежність похідної підйімальної сили від кута видуву струменя та швидкості останнього. Рис. 8 ілюструє, як змінюється аеродинамічна якість у залежності від кута та швидкості видування реактивного струменя. На рис. 9 зображено, як реактивний закрилок впливає на залежність  $C_{ya}(\alpha)$  у порівнянні з його відсутністю.

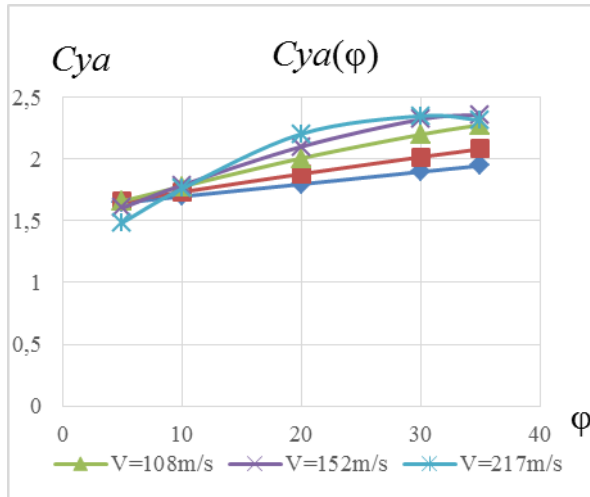


Рис. 7. Залежність похідної підйімальної сили від кута видуву струменя по швидкості

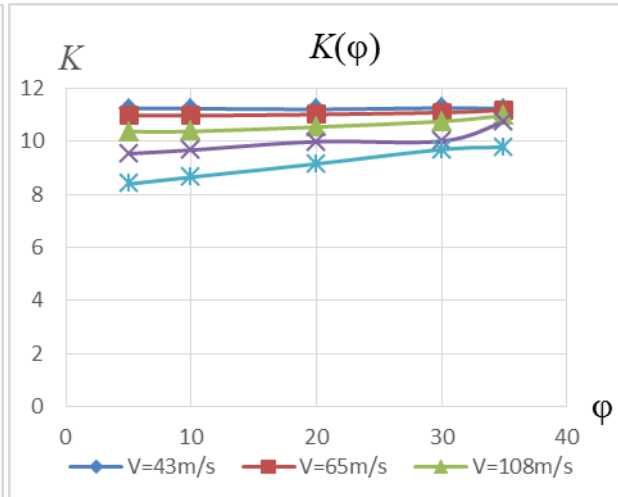


Рис. 8. Залежність якості від кута видуву струменю по швидкості

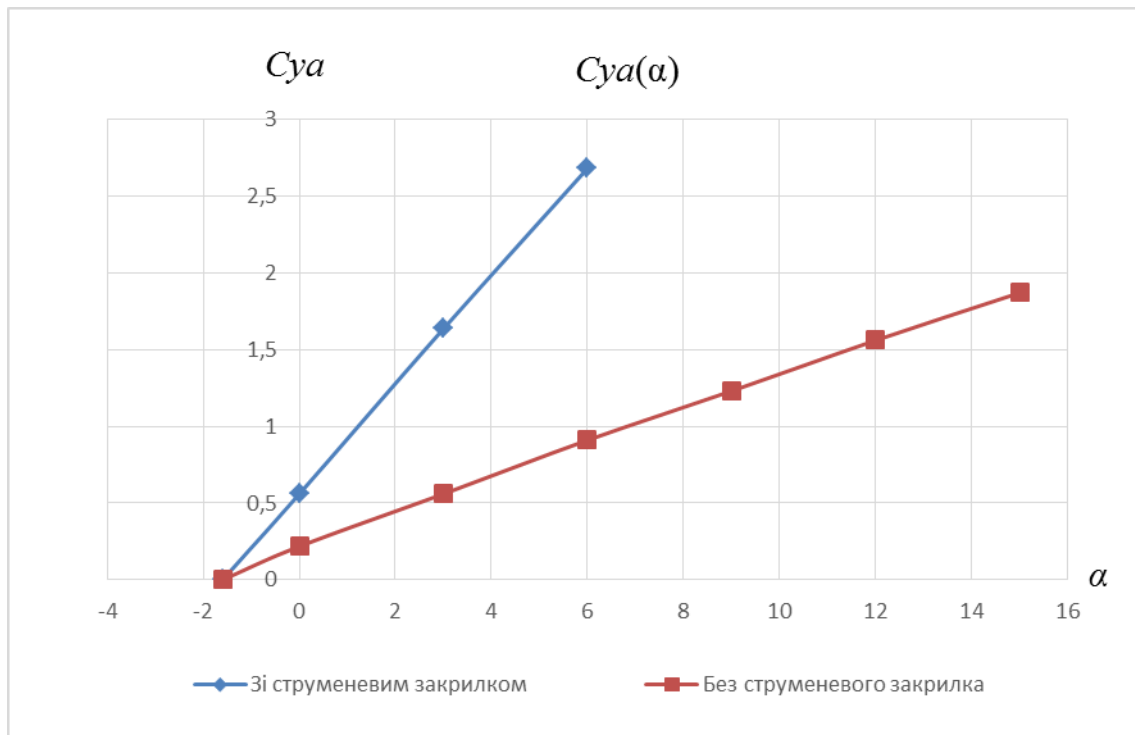


Рис. 9. Залежність похідної підйімальної сили від кута атаки

## Прилади та методи контролю

На основі отриманих результатів можна встановити наступні взаємозв'язки між дослідженими параметрами струменевого закрилка та аеродинамічними властивостями екраноплана:

- Реалізація струменевого закрилка в діапазоні швидкостей видуву від 43 м/с до 217 м/с дозволяє збільшити коефіцієнт підйимальної сили від 20 % до 60 %, що є вагомим внеском у аеродинаміку даного типу літальних апаратів;
- Коефіцієнт підйимальної сили  $C_y(\alpha)$  демонструє тенденцію до зростання при кутах видуву струменя до 30 град, особливо при значних швидкостях видуву (більших за 100 м/с), після чого його значення практично перестає змінюватися, отже значення кута  $\phi$  з міркувань ефективності та доцільності варто обмежити цим граничним значенням і в подальшому займатися розрахунками саме в даному діапазоні;
- Аеродинамічна якість  $K$  не демонструє тенденції до істотних змін, залишаючись практично сталою при усіх досліджених значеннях швидкості видуву струменя окрім максимального використаного значення 217 м/с, на якому має місце монотонне зростання до 33 % по мірі зростання кута  $\phi$  від 5 град. до 35 град. Це є ознакою того, що струменевий закрилок при зміні кута видування не призведе до зміни потрібної тяги, а, отже, до необхідності пов'язаних з цим додаткових керувальних дій по зміні режиму роботи силової установки;
- Наявність екрану землі суттєво збільшує ефективність роботи струменевого закрилка і, зокрема, похідну  $C_y(\alpha)$ , не змінюючи при цьому значення кута нульової підйимальної сили  $\alpha_0$ , що добре узгоджується з відомими теоретичними та практичними відомостями про вплив екрану землі на аеродинамічні характеристики літаків, а, значить, і свідчить про коректність розробленої математично-числової моделі обтікання крила з реактивним закрилком;
- Збільшення несучих властивостей екраноплану дозволяє зменшити площу крила відповідно від 1,2 до 1,6 разів залежно від швидкості струменя, що призведе до зменшення усіх лінійних розмірів екраноплану від 1,095 до 1,265 разів, а, отже, до зменшення маси його конструкції від 1,315 до 2,024 разів, тобто від 31,5 % до 102 %. Це зменшення розмірів екраноплану призведе до покращення його маневреності, а також до відповідного зростання здатності перевозити більше корисного навантаження.

### **Висновки**

Проведений аналіз запропонованого проектного рішення застосування струменевого закрилка на екраноплані переконливо довів, що дана пропозиція є доцільною для подальшої розробки та втілення, оскільки за рахунок підсилення ефекту екрану землі (основного чинника, що



обумовлює політ екраноплана над поверхнею землі), вона позитивно впливає на основні аеродинамічні характеристики даного типу ЛА, підвищує його маневреність, безпеку, екологічність та економічність. Ця модифікація також зменшує вагу і підвищує надійність за рахунок відсутності рухомих важких елементів механізації. Також ефективність струменевого закрilка збільшується поблизу екрана що є корисною властивістю саме для екраноплана. У подальших дослідженнях авторами планується дослідити описані вище ефекти на відповідній математичній моделі обтікання оздобленого струменевим закрilком екраноплана з метою визначення їх кількісних властивостей, а також оптимізувати на цій основі геометричні та режимні параметри як самого даного типу ЛА, так і функціонування системи забезпечення видуву струменя і, зокрема, визначити кути і швидкості (розходи) видування у залежності від маси, компонування та режиму руху екраноплана. Авторами на основі проведених шляхом математичного моделювання досліджень визначено ряд кількісних залежностей, що характеризують аеродинамічні властивості оздобленого струменевим закрilком екраноплана, і на цій основі визначено найбільш ефективні діапазони значень режимних параметрів системи забезпечення видуву струменя, таких як кути і швидкості (розходи) видування.

### Список використаної літератури

1. Шквар Є. О. Математичне моделювання турбулентних пристінних струменів на рифленій поверхні / Є. О. Шквар. // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2010. – №2. – С. 152–157.
2. BAE Systems, Безпілотний літальний апарат (БпЛА) DEMON [Електронний ресурс] / Cranfield University BAE Systems – Режим доступу до ресурсу: 2. <http://www.dailytechinfo.org/military/1715-bespilotnik-demon-pervyj-letatelnyj-apparat-sposobnyj-manevrirovat-bez-ispolzovaniya-rulej-i-yeleronov.html> .
3. Физика экранного эффекта [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://engine.aviaport.ru/issues/53/page20.html>.
4. Петров А. В. Энергетические методы увеличения подъемной силы крыла / А. В. Петров. 2011. – 404 с.
5. Экспериментальный самолет "Фотон" [Електронний ресурс] // СССР – Режим доступу до ресурсу: <http://www.airwar.ru/enc/xplane/foton.html> .